



UNIVERSIDAD CARLOS III DE MADRID

Mecánica de Medios Continuos y Teoría de Estructuras

**OPTIMIZACIÓN DE LA DISPOSICIÓN DE AIRBAGS
SOBRE UNA CÁPSULA PRISMÁTICA DE SECCIÓN
CUADRADA PARA ATERRIZAJE**

Carlos Javier Cantarero García

TRABAJO DE FIN DE GRADO

Bajo la dirección de:

D. Ramón Eulalio Zaera Polo

MADRID

Septiembre de 2017

Índice:

1. Motivación y objetivos.....	8
2. Antecedentes	11
2.1. Principales misiones en Marte	12
2.2. Sistemas de airbags en vehículos y objetos terrestres	14
2.3. Sistemas de airbags en vehículos aeroespaciales	16
2.3.1. Project Mercury	16
2.3.2. Luna 9	17
2.3.3. Mars Pathfinder.....	18
2.3.4. Exomars	20
3. Metodología.....	21
3.1. Introducción.....	21
3.2. Datos e hipótesis de nuestro modelo	22
3.3. Implementación del modelo en Abaqus	23
4. Análisis de los resultados obtenidos	32
4.1. Comentarios previos	32
4.2. Análisis de convergencia	38
4.3. Modelo 1.....	41
4.4. Modelo 2.....	44
4.5. Modelo 3.....	47
4.6. Modelo 4.....	49
4.7. Modelo 5.....	51
4.8. Modelo 6.....	54
4.9. Modelo 7.....	56
4.10. Modelo 8.....	58
4.11. Modelo 9.....	61
4.12. Modelo 10.....	64
4.13. Modelo 11.....	67
4.14. Modelo 12.....	70
4.15. Modelo 13.....	73
4.16. Modelo 14.....	74

4.17. Modelo 15.....	76
4.18. Modelo 16.....	78
4.19. Modelo 17.....	80
5. Conclusiones	85
6. Trabajos futuros.....	87
7. Bibliografía.....	88

Índice de ilustraciones

Ilustración 1: Marte (a)	8
Ilustración 2 : Imagen Rover (b).....	9
Ilustración 3: Comparación Tierra-Marte (c)	11
Ilustración 4: Imágenes de los cráteres obtenidas en la misión Mariner 4	12
Ilustración 5: Phobos y Deimos.....	13
Ilustración 6: Honda dubbed case (d)	14
Ilustración 7: Toboganes Airbus A380 (e)	15
Ilustración 8: airbag moto (f).....	15
Ilustración 9: comparación sistema de airbags (g).....	15
Ilustración 10: Cápsula Project Mercury en el espacio (h)	16
Ilustración 11: Aterrizaje de Luna 9 y liberación de la cápsula (i).....	17
Ilustración12: Airbags y cápsula de Mars Pathfinder (j)	18
Ilustración 13: Cotas de interés airbags Pathfinder (j)	19
Ilustración 14: Sistema de aterrizaje Exomars	20
Ilustración 15: Opciones dentro del módulo Part.....	24
Ilustración 16: Coeficientes Mooney-Rivlin del material del airbag	25
Ilustración 17: Superficie de contacto donde se muestra encastre y vector de la gravedad del modelo	25
Ilustración 18: Creación de Field Output Request, Intervalos y variables seleccionadas.....	27
Ilustración 19: Creación de History Output Request, intervalos y variables seleccionadas.	28
Ilustración 20: Selección de punto de la cavity, superficie interior y presión ambiente	29
Ilustración 21: Elección de la superficie externa e interna de airbag con una cavidad fluida	29
Ilustración 22: Diferencias entre los elementos de la malla entre airbag y prisma	30
Ilustración 23: Tensión de Von Mises en el impacto de airbag	32
Ilustración 24: tabla de propiedades mecánicas (k).....	33
Ilustración 25: Esfera presurizada en tiempo 0,5 s	34
Ilustración 26: Esfera presurizada en tiempo 4,5s	34
Ilustración 27: Esfera presurizada en tiempo 1s.....	35

Ilustración 28: Esfera presurizada en tiempo 7s.....	35
Ilustración 29: Geometría paredes rígidas en las que comprobaremos distintos ángulos de impacto.	36
Ilustración 30: Gráfica aceleraciones obtenida del History Output de Abaqus.....	36
Ilustración 31: History output con espacio con 20000 intervalos. Muestra mayor número de datos para un mismo ensayo y modelo.....	37
Ilustración 32: History Output con 200 intervalos. Omisión de intervalos importantes en los resultados	37
Ilustración 33: Gráfica: número de elementos vs tensión de Von Mises del análisis de convergencia	40
Ilustración 34: Convergencia temporal automática realizada por Abaqus. Valores introducidos	40
Ilustración 35: Parámetros bulk viscosity introducidos.....	41
Ilustración 36: Primer modelo	41
Ilustración 37: Modelo 1- cotas interés.....	42
Ilustración 38: Ensayo 1-modelo 1. Espacio entre cápsula y suelo	43
Ilustración 39: Ensayo 2-modelo 1. Espacio entre cápsula y suelo muy reducido.....	43
Ilustración 40: Modelo 2.....	44
Ilustración 41: Airbag modelo 2 superficie coincidente con el prisma	45
Ilustración 42: Cotas de interés modelo 2.....	45
Ilustración 43: Modelo 3.....	47
Ilustración 44: Cotas de interés modelo 3.....	48
Ilustración 45: Modelo 4.....	49
Ilustración 46: Sección modelo 4, disposición de los tubos	50
Ilustración 47: Modelo 5.....	51
Ilustración 48: Modelo 5-2.....	51
Ilustración 49: Impacto modelo 5. Impacto entre cápsula y superficie	53
Ilustración 50: Modelo 6.....	54
Ilustración 51: Modelo 6- uniones.....	55
Ilustración 52: Mass properties del modelo 6.....	56
Ilustración 53: Modelo 7.....	56
Ilustración 54: Impacto modelo 7, distorsión de la geometría inicial.....	58
Ilustración 55: Modelo 8.....	58
Ilustración 56: Sección del modelo 8	59
Ilustración 57: Impacto modelo 8, los extremos se separan durante el ensayo	61
Ilustración 58: Modelo 9.....	61
Ilustración 59: Cotas de interés modelo 9	62
Ilustración 60: Cotas de interés 2-modelo 9.....	63
Ilustración 61: Modelo 10.....	64
Ilustración 62: Cotas de interés modelo 10.....	65
Ilustración 63: Cotas de interés 2- modelo 10	65
Ilustración 64: Modelo 10 impacto en geometría cerrada.....	66
Ilustración 65: Ensayo pirámide velocidad 4, 8, 6 m/s	67
Ilustración 66: Modelo 11	67
Ilustración 67: Cotas de interés modelo 11	68

Ilustración 68: Ensayo modelo 11, impacto contra superficie	69
Ilustración 69: Ensayo (bis) modelo 11, los extremos se separan al no estar unidos	69
Ilustración 70: Modelo 12.....	70
Ilustración 71: Ensayo 7 modelo 12, Mayor cantidad de aire en la zona contraria al impacto	71
Ilustración 72: Ensayo 2 modelo 12 Mayor cantidad de aire en la zona del impacto	71
Ilustración 73: Ensayo pirámide modelo 12, Airbag rebotando	72
Ilustración 74: Ensayo pirámide modelo 12 (bis). Aceleraciones	72
Ilustración 75: Modelo 13.....	73
Ilustración 76: Modelo 14.....	74
Ilustración 77: Corte modelo 14.....	75
Ilustración 78: Airbag lateral modelo 15.....	76
Ilustración 79: Sección central modelo 15.....	76
Ilustración 80: Modelo 15.....	77
Ilustración 81: Modelo 16.....	78
Ilustración 82: Cotas de interés modelo 16.....	78
Ilustración 83: Ensayo 5 modelo 16 volumen retenido en airbag inferior.	79
Ilustración 84: Modelo 17	80
Ilustración 85: Airbag lateral modelo 17.....	81
Ilustración 86: Airbag central modelo 17	81
Ilustración 87: Geometría modelo 17	82
Ilustración 88: Ensayo 3 modelo 17 espacio sobrante en amortiguación.....	83
Ilustración 89: Aceleración ensayo geometría cerrada velocidad 5, 10, 15 m/s	83
Ilustración 90: Variaciones en la velocidad en el ensayo geometría cerrada	84
Ilustración 91: Aceleración ensayo a velocidades 20, 10, 5 m/s en superficie cerrada.....	84

1. Motivación y objetivos

La conquista de Marte se ha convertido en una parte importante dentro de la carrera de las agencias aeroespaciales por ser presumiblemente el planeta más habitable del sistema solar para nosotros. Desde la década de los 60 que empezó este estudio se han iniciado casi medio centenar de misiones enfocadas al planeta rojo, pero no todas han tenido el éxito que buscaban. Una vez desarrollada la tecnología necesaria y conseguido el aumento del éxito en las misiones, la Nasa intentó implantar una política de ahorro de costes en algunos de sus proyectos para poder incrementar su número. En este contexto se desarrollaron los sistemas de aterrizaje mediante airbags. [1]

Las primeras misiones allá por 1970, motivadas por la rivalidad entre la URSS y Estados Unidos, tenían como objetivo la toma de fotografías de este planeta desde su órbita.

Con la evolución de la humanidad y de la tecnología cada vez se persiguen objetivos más ambiciosos como la misión ExoMars 2016, llevada a cabo por la Agencia Espacial Europea, que persigue aterrizar dos vehículos en Marte para estudiar su superficie e incluso realizar excavaciones para analizar el sustrato de Marte y traerlo de vuelta a la tierra. [2]

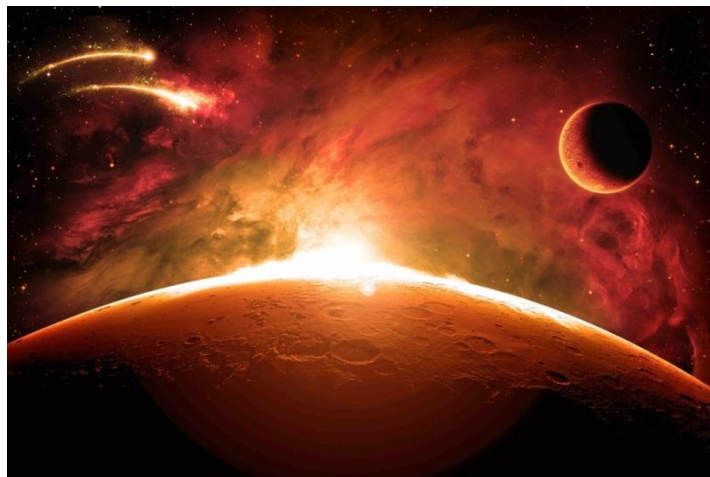


Ilustración 1: Marte (a)

Después de unos años estudiando la composición de la atmósfera de Marte y mapeando su superficie, las distintas agencias espaciales se han propuesto una meta, que el ser humano pise su suelo. Para ello todavía tenemos que mejorar tanto la información que tenemos de este planeta como la tecnología que hace posible enviar vehículos espaciales hasta él.

Sabemos que en la carrera por la conquista de Marte se han tenido diversos problemas en distantes fases del envío de vehículos astroterrestres (*Ilustración 2*) y satélites a sus órbitas. Debemos estudiar cada fallo para aprender de nuestros errores, así como de los triunfos, para seguir evolucionando acercándonos a los ambiciosos objetivos que nos proponemos.

Hoy en día contamos con aplicaciones informáticas que ayudan al desarrollo y evolución de la ciencia. Estas nos permitirán simular condiciones y procesos que supusieran grandes desembolsos económicos, o que directamente no se puedan reproducir en la tierra. Con este fin, utilizando información de otros proyectos lanzados anteriormente, intentaremos contribuir con nuestro granito de arena al avance de este sector de la ciencia.

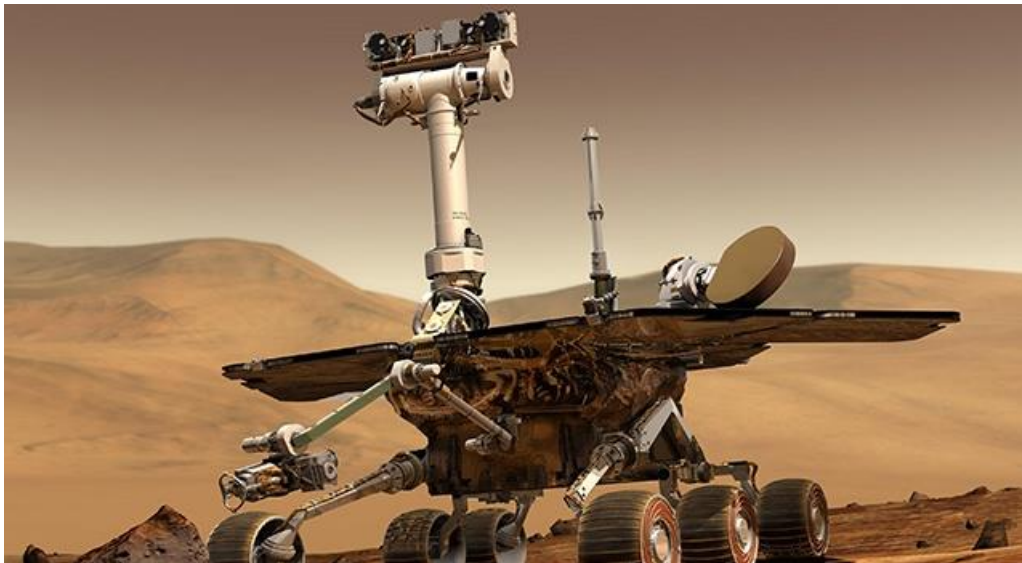


Ilustración 2 : Imagen Rover (b)

En este trabajo trataremos el aterrizaje de un vehículo en Marte. De los distintos sistemas posibles hemos elegido el aterrizaje mediante airbags. Para esta elección hemos tenido en cuenta anteriores misiones y test que ha utilizado este tipo de sistemas de aterrizaje con un buen resultado, como es el caso de la misión Pathfinder o en el Boeing CST-100. [3]

El objetivo de este trabajo es la optimización de la disposición de un sistema de airbags sobre una cápsula prismática de sección cuadrada para el aterrizaje.

Para llegar a este trataremos de dar respuesta a distintas preguntas de investigación que nos ayudarán a avanzar hasta el objetivo, centrándonos en partes más pequeñas de nuestro problema.

La primera pregunta que nos planteamos es “¿cómo influye la presión existente en los airbags en un aterrizaje?” La segunda pregunta de investigación que nos marcamos es “¿qué disposición deberán tener?” La tercera pregunta es “¿cuál será el número de airbags adecuado?” La cuarta y última pregunta a resolver en este trabajo es “¿conviene que estén unidos entre sí para un intercambio de fluido?”.

En relación a los resultados obtenidos en los distintos ensayos realizados en Abaqus, crearemos un modelo que optimice los resultados de las cuestiones planteadas anteriormente.

2. Antecedentes

Marte es el cuarto planeta del sistema solar en relación con la distancia al Sol, existiendo una distancia entre ambos de $2.49232 \cdot 10^8$ km, algo menos del doble de la distancia entre la máxima distancia entre el Sol y la tierra, $1.52098 \cdot 10^8$ km. Presenta un diámetro aproximado de 6792km, esto viene a ser aproximadamente igual a la mitad del diámetro de La Tierra, unos 12,756 km. (*Ilustración 3*) [4]

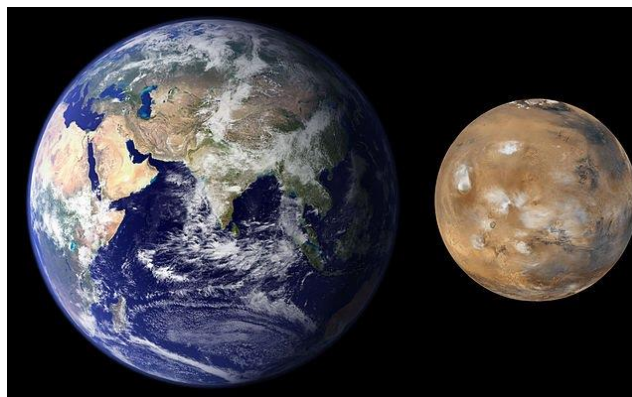


Ilustración 3: Comparación Tierra-Marte (c)

Su temperatura media es de -63°C , presentando máximas de 30°C y mínimas de -140°C . En este planeta existen cuatro estaciones al año, dependiendo de su posición relativa al Sol. Marte tardará en dar una vuelta al Sol unos 687 días, mientras que el periodo de rotación en torno a su propio eje es de 24 horas y 40 minutos. A diferencia de la composición de la atmósfera de la Tierra, que presenta un 78% de nitrógeno, un 21% de oxígeno y el 1% restante de otros gases, la atmósfera de Marte presenta un 96% de dióxido de carbono, del que adquiere su característico color rojo. [5]

Vamos a dividir el apartado de antecedentes en tres partes, la primera explicará las principales misiones llevadas a cabo en Marte, la segunda la evolución de los airbags y su implantación en objetos y vehículos terrestres, por último el desarrollo del airbag en la industria aeroespacial.

2.1. Principales misiones en Marte

El primer lanzamiento tuvo lugar el día 10 de Octubre de 1960, llevado a cabo por la URSS, Marsnik 1 (Korabl 4) fracasó, no consiguió alcanzar la órbita de la Tierra. Tras esto se sucedieron una serie de misiones que no obtuvieron éxito alguno, hasta que los Estados Unidos con la misión Mariner 4 lanzada el día 28 de Noviembre de 1964 consiguió mandar de vuelta 21 fotografías en blanco y negro (*Ilustración 4*) de los cráteres de la superficie de Marte. [6]

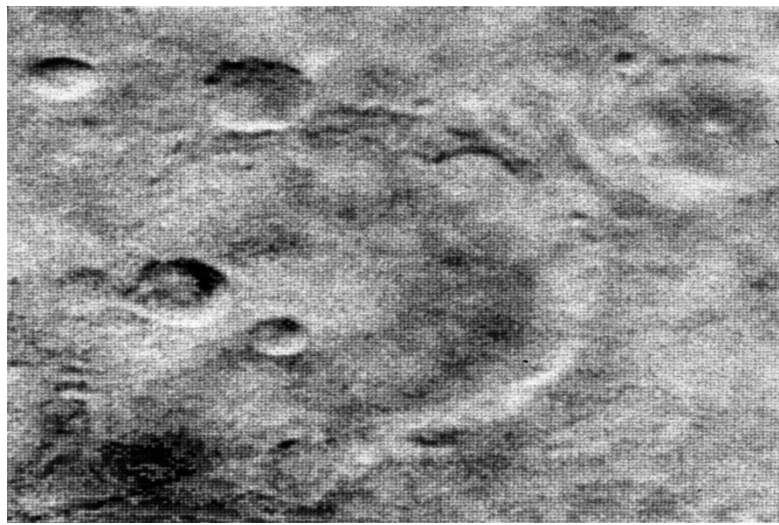


Ilustración 4: Imágenes de los cráteres obtenidas en la misión Mariner 4

Esta misión fue el mayor acercamiento al planeta, quedándose a 9846 Km de su superficie. Las siguientes misiones que consiguieron retornar datos a la Tierra fueron en 1969, Mariner 6 y Mariner 7 (US) quedándose ambos a 3430 Km de la superficie marciana. [6]

Tras estos éxitos tomando fotografías de Marte, el siguiente paso era conseguir aterrizar en el planeta. El primer intento fue con la misión Mars 2 (URSS) lanzada el 19 de Mayo de 1971 en la que se envió un satélite y un vehículo, pero este se quemó en la entrada a la atmósfera, con lo que no se obtuvo ningún dato de él pero si del orbitador. [6]

Nueve días después del lanzamiento de Mars 2, la URSS lanzó el Mars 3, que a diferencia de un antecesor, sí consiguió aterrizar pero a los 20 segundos de aterrizar se perdió el contacto con este. La URSS volvió a intentar el aterrizaje en Mars 6 en 1973 pero se perdió el contacto con el vehículo justo antes de su aterrizaje. En la misión Mars 7, lanzada unos

días después de la misión Mars 6, se cometió un error al soltar el vehículo y no se consiguió su aterrizaje. [6]

Unos años antes los Estados Unidos enviaron Mariner 9, un satélite que daba la vuelta al planeta dos veces al día analizando la atmósfera y tomando fotografías. En ellas se revelaron grandes cráteres y cañones que tomaban grandes extensiones de terreno en la superficie de Marte. En esta misión se observaban cauces de ríos secos tallados en la árida superficie pero que algún día transportaron fluidos. Las fotos obtenidas fueron de gran importancia, incluso se tomaron de las lunas de Marte, Deimos y Phobos (*Ilustración 5*). [6]

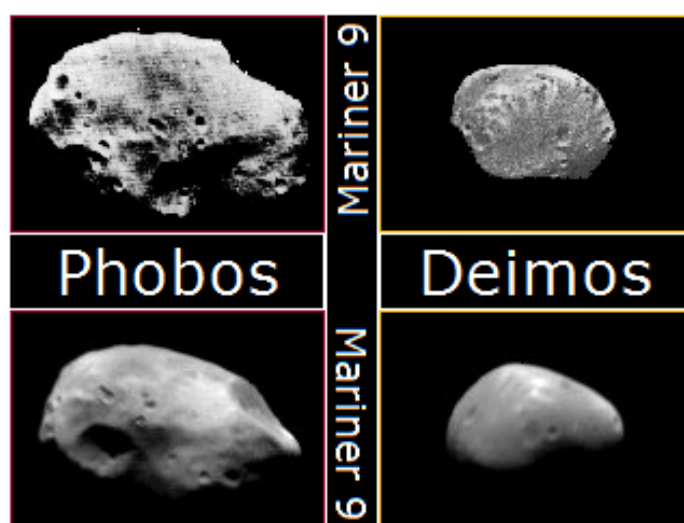


Ilustración 5: Phobos y Deimos

En 1975 Viking 1 y Viking 2 (US) consiguieron aterrizar en la superficie operando más de 6 años. Estos vehículos fueron mandados a distintas regiones de Marte para cubrir la mayor distancia posible analizando la existencia de vida en Marte. Ambos tenían la capacidad de recoger muestras de superficie y analizarlas en un pequeño laboratorio incorporado. En estas misiones no se demostró la existencia de microbios en el planeta. [6]

A medida que la tecnología avanzaba se lanzaron nuevos satélites con la capacidad de obtener información que antes no se podía. En 1996, Mars Global Surveyor recogió durante 2 años más información que cualquier otra misión en este planeta. [6]

Más tarde fueron lanzados Mars Pathfinder and Sojourner, que consiguieron aterrizar en Marte con un sistema de 24 airbags, estos detuvieron el impacto en la superficie marciana tras una serie de rebotes. [6]

2.2. Sistemas de airbags en vehículos y objetos terrestres

Los airbags han tenido también usos como sistemas de atenuación de impactos en vehículos, helicópteros, motocicletas e incluso teléfonos móviles. En este apartado veremos algunas adaptaciones.

Recientemente Honda desarrolló una carcasa formada por 6 pequeños airbags (*Ilustración 6*) para teléfonos móviles los cuales se activan en caso de caída o robo. [7]

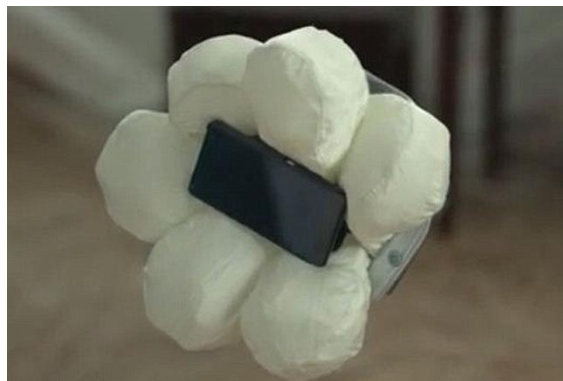


Ilustración 6: Honda dubbed case (d)

Los sistemas de airbags también tienen otro uso que no es estrictamente el de la atenuación de impactos. Por ejemplo, tras un aterrizaje de emergencia en un avión de transporte de pasajeros conviene desalojar al mayor número de personas en el menor tiempo posible (*Ilustración 7*). El uso de airbags a modo de tobogán es una de las posibles soluciones.

Esto presenta una serie de ventajas debido a que este sistema de emergencia ocupa poco espacio, pudiéndose almacenar de manera compacta.

El inconveniente que pueden presentar estos sistemas es la cantidad de aire necesaria para conseguir una presión suficiente en su interior.



Ilustración 7: Toboganes Airbus A380 (e)

Con generadores de aire podemos hinchar grandes volúmenes en muy poco tiempo. Un ejemplo de esto son los airbags incorporados en los coches y en algunas motos capaces de inflarse justo en el momento en que se produce un accidente, llegando así a amortiguar el impacto.



Ilustración 8: airbag moto (f)

Ilustración 9: comparación sistema de airbags (g)

2.3. Sistemas de airbags en vehículos aeroespaciales

Tras unos años de envíos al espacio, surgía una nueva necesidad, la de traer de vuelta el material enviado y recogido en las diferentes misiones. Todo ello forzó el desarrollo de sistemas de aterrizaje seguros. En este apartado veremos algunas en las que se utilizaron airbags como sistema de aterrizaje.

2.3.1. *Project Mercury*



Ilustración 10: Cápsula Project Mercury en el espacio (h)

El Project Mercury fue uno de los pioneros en los viajes espaciales, tuvo sus inicios a finales de 1958. Este proyecto se llevó a cabo por los Estados Unidos y se vio impulsado por la rivalidad existente con la Unión Soviética tras poner el primer satélite orbitando alrededor de la tierra. [8]

Con este proyecto surgió el concepto de astronauta como persona que viaja al espacio y con ello el desafío que representa el diseño y construcción de una cápsula que maximice la

seguridad de las personas que viajan en ella. Al llevar una carga tan importante como es una persona no se podían permitir que hubiese ningún error. [8]

De esta manera se desarrolló una cápsula con forma de cono truncado, con un recubrimiento muy delgado para ahorrar peso, lo que a su vez representaba un problema. La cápsula era estable cuando tenía sus depósitos de combustible llenos, pero en la entrada a la atmósfera terrestre, cuando los niveles de combustible eran mínimos y el peso también, representaba un problema viéndose afectada la estabilidad. Además de esto constaba con un escudo térmico que le protegería en la reentrada en la atmósfera.

Para el amerizaje contaba con un sistema de airbag que se inflaba de una manera pasiva, esto es, a medida que la cápsula entrase en la atmósfera, el escudo de protección térmica se iría deteriorando y dejaría al descubierto unos orificios que conducían aire a través de unos conductos que inflarían el airbag. [9]

2.3.2. *Luna 9*

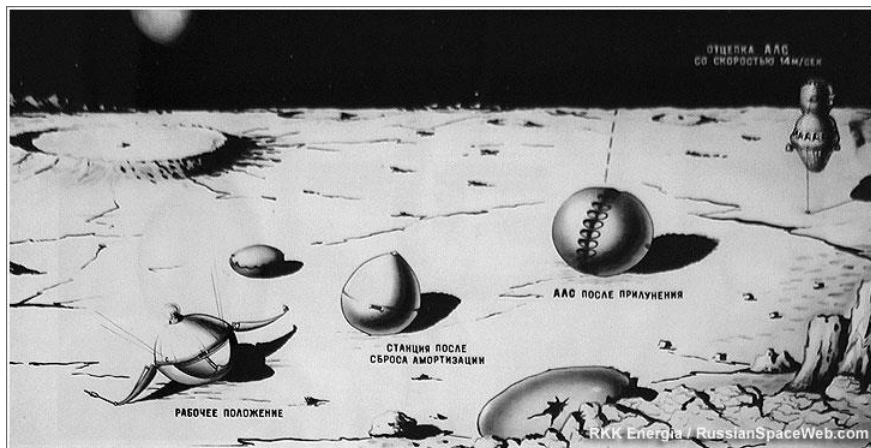


Ilustración 11: Aterrizaje de Luna 9 y liberación de la cápsula (i)

La misión fue lanzada el 31 de Enero de 1966 y tenía el objetivo de realizar un aterrizaje seguro en la Luna.

Este experimento llevado a cabo por la URSS constaba de una cápsula con material científico que una vez se encontrase a una cierta distancia de la superficie lunar se recubriría con unos airbags. El descenso estaba controlado con la ayuda de retrocohetes que ayudaban a reducir la velocidad y a estabilizar el conjunto. [10]

2.3.3. *Mars Pathfinder*

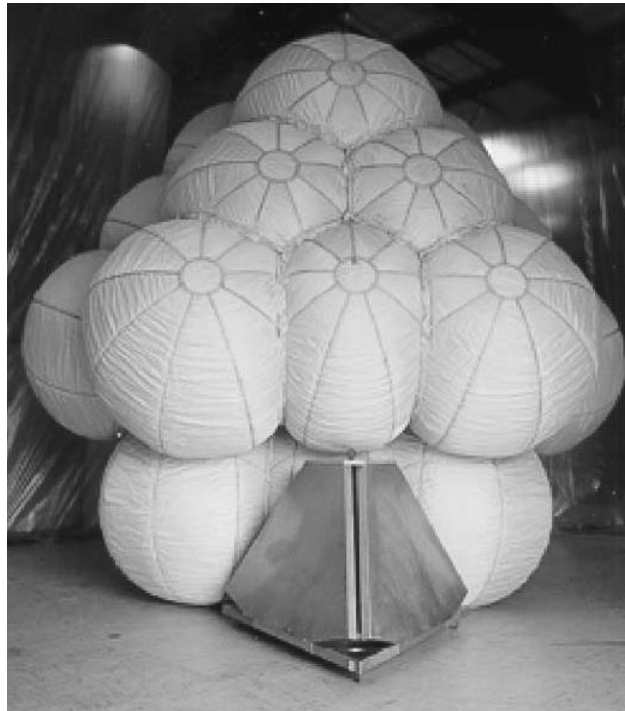


Ilustración12: Airbags y cápsula de Mars Pathfinder (j)

El proyecto The Mars Pathfinder se lanzó en Diciembre de 1996, teniendo como finalidad el desarrollo de un sistema EDL (entry, descend and landing) de bajo coste. Este sistema constaba de escudo térmico, paracaídas y un conjunto de airbags como elementos de amortiguación de la energía. [1]

El Pathfinder en conjunto pesaba 290 Kg y durante el aterrizaje estaba dentro de una cápsula tetraédrica. Este es un caso bastante parecido al nuestro, por lo que vamos a estudiarlo en mayor profundidad. [1]

En primer lugar, en la secuencia de aterrizaje, se liberaba el airbag de los paracaídas a unos 8 segundos antes del impacto, un altímetro daba la señal para cortar el cable que empaquetaba los airbag liberando estos. Después de cortar el cable que mantenía empaquetado los airbags, se inflaban hasta una presión de 10600 Pa en 1,5 segundos. [1]

Una vez se producía el contacto con la superficie, el sistema rebotaba no superándose la deceleración establecida de 19 G's. Los distintos airbags estaban comunicados entre sí mediante conductos internos. Los generadores de gas continuaban suministrándolo hasta los 20 segundos, para contrarrestar la contracción del gas en el frío ambiente de Marte. [1]

Finalmente, cuando el conjunto entraba en reposo, se purgaba el gas de los airbags y se abría la cápsula para la liberación del vehículo. En total se utilizaron 4 airbags, cada uno con 6 esferas con la geometría mostrada en la Ilustración 13[1]

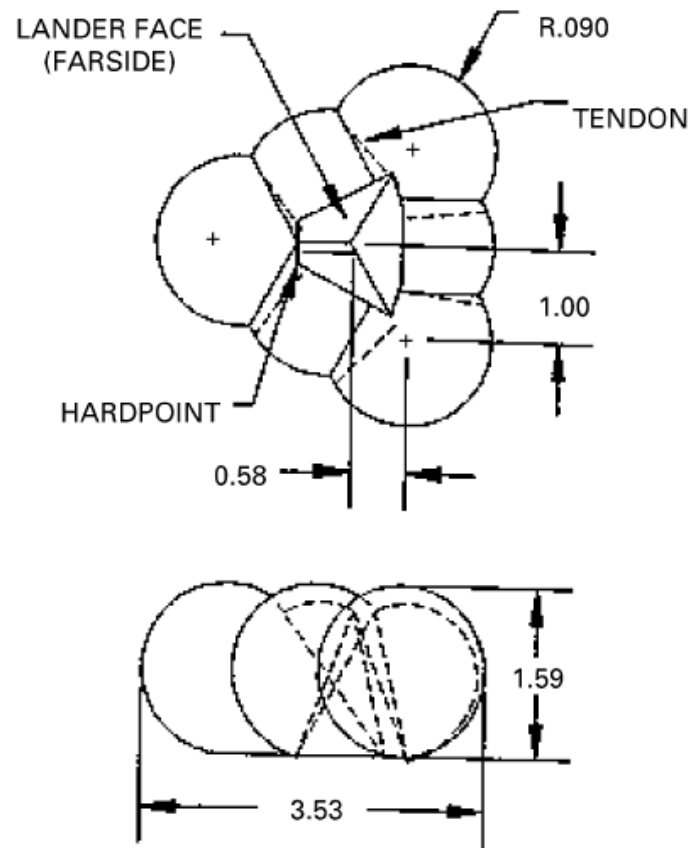


Ilustración 13: Cotas de interés airbags Pathfinder (j)

2.3.4. *Exomars*

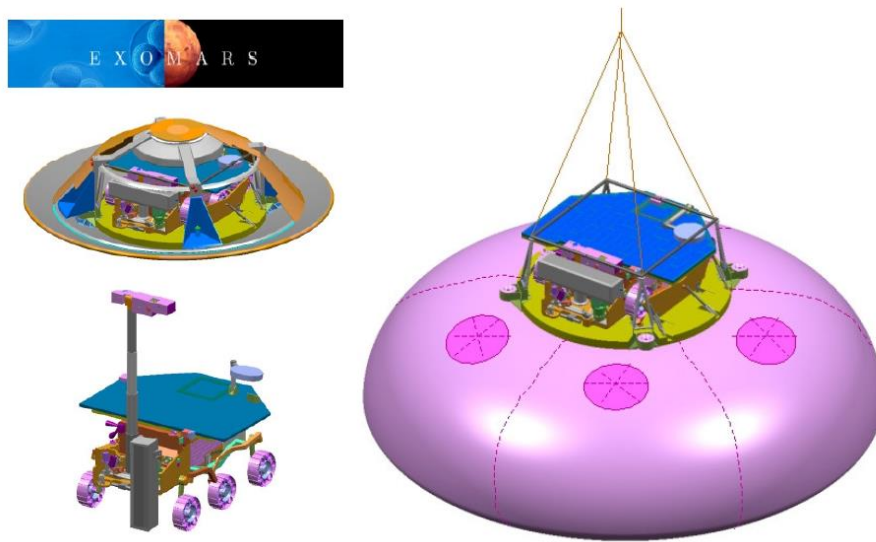


Ilustración 14: Sistema de aterrizaje Exomars

En este caso los airbags se utilizaron de otra forma. El conjunto no debía rebotar, si no que disiparía la energía del impacto mediante la expulsión controlada del aire al exterior, de tal manera que podremos controlar el rebote y limitar la deceleración. [11]

En esta misión se enviaría un rover a Marte para comprobar la existencia de vida. Para ello el rover estaba equipado con un taladro y distintos dispositivos para la recogida de muestras. El peso total iba a ser de 240 kg, pero se consiguió bajar hasta 150 kg. La misión fue lanzada en 2011 y tras recorrer una distancia de 500 millones de kilómetros llegaría a Marte un año después. [11]

El airbag estaba diseñado para amortiguar el rover a una velocidad de 25 m/s en un tiempo de 100 milisegundos dando como resultado una deceleración de 80 G. En esta misión se instaló el rover sobre una plataforma encima del airbag. [11]

3. Metodología

3.1. Introducción

El objetivo de este trabajo es optimizar la disposición de un sistema de airbags para una cápsula prismática de sección cuadrada. Para llevar a cabo esta tarea haremos uso del software de elementos finitos Abaqus.

La simulación mediante el Método de los Elementos Finitos, es un método numérico que nos permitirá aproximar la respuesta de un cuerpo sometido a unas determinadas condiciones y cargas. Para los materiales elásticos este método transformará las ecuaciones diferenciales que gobiernan el proceso por ecuaciones algebraicas que son resolubles por un computador. [12]

Para realizar esta transformación el método se apoyará en el Principio de la Energía Potencial Mínima. Dividirá el sólido a estudio en elementos más pequeños y con geometría más sencilla que en el caso principal, en Abaqus lo realizaremos con el mallado.

Cada elemento está constituido por un número de nodos y unas funciones de interpolación local, con los que evaluaremos las diferentes variables que nos interesan partir de los resultados obtenidos en los nodos, en Abaqus esto lo controlaremos mediante el Field Output.

Cada elemento en los que hemos dividido nuestro sólido presentará una matriz de rigidez local, conseguida a partir de la integración del volumen. Posteriormente el programa se encargará de ensamblar estas matrices para construir la matriz de rigidez global. [12]

Este tipo de software es muy útil a día de hoy en la ingeniería, permitiendo ahorrar dinero, materiales y tiempo en la construcción de prototipos y diseños finales. Abaqus nos permitirá optimizar el diseño de estos prototipos pudiendo ver e intuir su comportamiento.

La interpretación de resultados y los errores arrojados por Abaqus es una fase importante del proceso. Con una buena interpretación conseguiremos un modelo más depurado que funcionará mejor.

Después del estudio con el Método de los elementos Finitos, se completará la fase de diseño con la fabricación de prototipos. En esta fase se utilizarán las conclusiones y resultados obtenidos de los ensayos en ordenador para crear un modelo lo más fiable posible.

Con el fin de dar respuesta a las preguntas formuladas en los objetivos, realizaremos modelos que nos ayuden a entender nuestro proceso de amortiguación. Probaremos con distintos tipos de geometrías y trataremos de seguir un proceso de evolución de modelos sencillos a otros más complejos.

3.2. Datos e hipótesis de nuestro modelo

Ahora vayamos con la definición de nuestro modelo en Abaqus utilizado para simular las condiciones de nuestro impacto en Marte.

Estos son los datos e hipótesis utilizados en nuestro problema:

- Proceso dinámico
- Condiciones de Marte:
 - Presión en Marte: Aproximadamente el 0.6% del valor en la tierra = 600 Pa
 - Temperatura en Marte= 213 K = -60°C
 - Temperatura cero absoluto= -273.16 K
 - Aceleración de la gravedad en Marte = 3.71 m/s²

En nuestro trabajo no utilizaremos distintos tipos de gases porque nos centraremos en la distribución de los airbags. Como gas dentro de los airbags utilizaremos aire que se comportará con las siguientes ecuaciones:

- Fluido interno
 - Peso molecular= 0.02896 kg/mol
 - Capacidad calorífica molar= 28.96 J/mol.K
 - Constante universal gas= 8.3144 J/ mol.K

La cápsula la tomaremos como un sólido rígido indeformable.

- Características de la cápsula a proteger:
 - Masa de la cápsula=500 Kg
 - Dimensiones de la cápsula (prisma base cuadrada); longitud lado=1 m; altura = 2m
 - Volumen= 2 m^3
 - Densidad cápsula= $500\text{kg}/2\text{m}^3 = 250 \text{ kg}/\text{m}^3$
 - Módulo elástico material del cubo = $2,1 \cdot 10^9 \text{Pa}$; coeficiente de Poisson= 0,3

El material de la membrana de los airbags lo introduciremos como un material hiperelástico; Mooney-Rivlin (coeficientes):

- Material de la membrana:
 - $C10=0.69 \text{ MPa}$
 - $C01= 0.173 \text{ MPa}$
 - $D1=1.45\text{e-}08 \text{ Pa}^{-1}$
 - Densidad= $1068 \text{ kg}/\text{m}^3$

Estas ecuaciones corresponden a un tipo de caucho comercial.

Introduciendo esos datos seguiremos los siguientes pasos haciendo uso de los distintos módulos de Abaqus para definir nuestro modelo.

3.3. Implementación del modelo en Abaqus

Con ayuda del módulo Part crearemos las geometrías con las que conformaremos nuestros airbags. Cuando creamos una part en nuestro modelo debemos seleccionar de que tipo es (*Ilustración 15*).

Todas nuestras piezas serán 3D. El prisma y los airbags los seleccionaremos como deformable, en cambio las superficies contra las que rebotarán los modelos serán superficies rígidas que no se deformarán. .

Para la creación del prisma marcaremos deformable, solid. Para los airbags deformable, Shell.

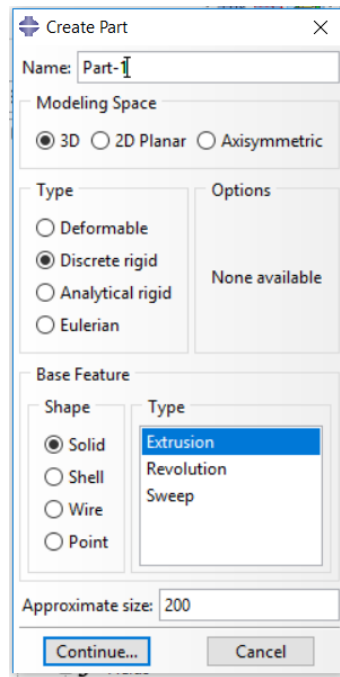


Ilustración 15: Opciones dentro del módulo Part

El siguiente módulo que nos encontramos es el módulo Property. En él introduciremos los datos de los materiales utilizados para nuestros modelos. En nuestro caso hemos metido dos materiales distintos.

En el caso del prisma, al tratarse de un sólido rígido utilizaremos la configuración de sección solid-homogeneous. Este tipo de sección es muy común para modelos en Abaqus, están presentes contactos, plasticidad y grandes deformaciones. En este módulo también tendremos que indicar las propiedades del material, en nuestro caso solamente estará formado por un material, al ser homogéneo. Aquí introduciremos el Módulo de Young, coeficiente de Poisson y la densidad.

Para los airbags utilizaremos un material hiperelástico, isótropo, Mooney-Rivlin con los coeficientes que definen el comportamiento del material tal y como muestra la Ilustración 16. Para los airbags, utilizaremos una sección Shell-membrane, con un grosor de 3 cm. Este tipo de sección se caracteriza porque no soporta flectores ni tensión tangencial, solo soportará tensiones cuyas componentes sean paralelas a la superficie media de la membrana. La membrana soportará un estado de tensión plana. [13]

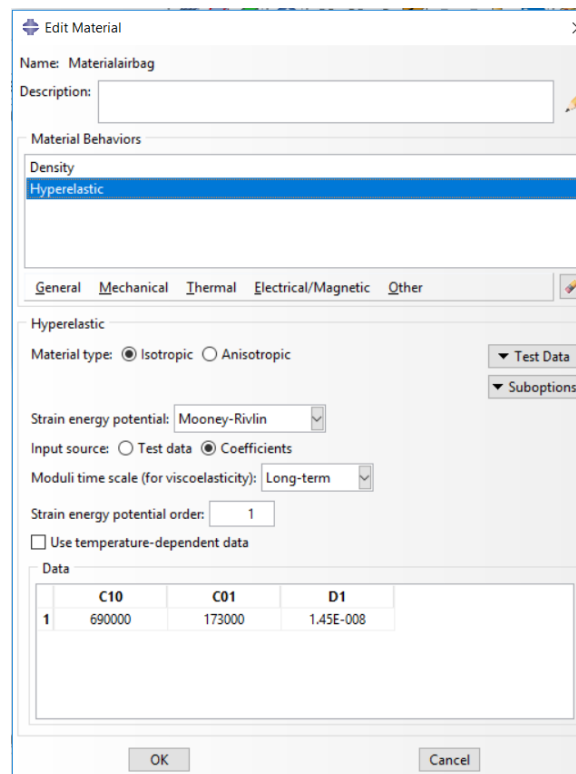


Ilustración 16: Coeficientes Mooney-Rivlin del material del airbag

Como superficie de Marte en este trabajo vamos a utilizar una parte Analíticamente Rígida con forma de disco y restringiremos en esta todos los grados de libertad (*Ilustración 17*). No se deformará ni se desplazará cuando nuestro airbag impacte en ella.

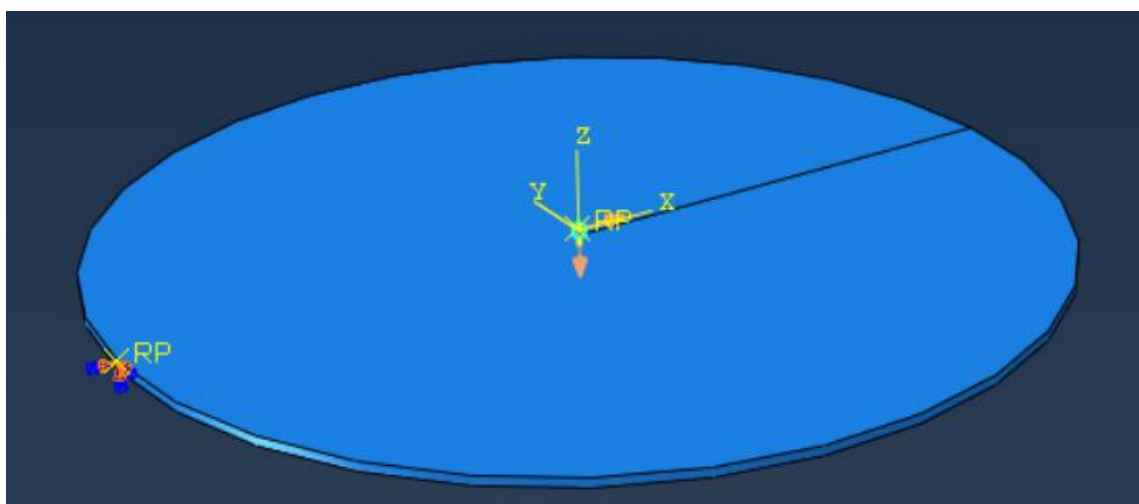


Ilustración 17: Superficie de contacto donde se muestra encastre y vector de la gravedad del modelo

En el módulo Assembly construiremos el conjunto a ensayar y colocaremos los distintos componentes de nuestro modelo en su posición inicial. En él juntaremos distintas geometrías mediante merge/cut instances, rotaremos y trasladaremos las instances para colocarlas en su posición.

El siguiente módulo, Step definiremos el tipo de proceso que vamos a estudiar. Abaqus ofrecerá varios métodos para realizar procesos dinámicos en los que los efectos de la inercia son considerados. En nuestro modelo utilizaremos el tipo Dynamic, debido a que el fenómeno a estudiar es un impacto. Dentro del tipo Dynamic podremos seleccionar entre análisis tipo Implicit y tipo Explicit. En un análisis Implicit Dynamic la inversión de las matrices pertenecientes a los nodos debe ser invertida en un conjunto de ecuaciones no lineales que debe ser resuelta cada incremento de tiempo. En un análisis Explicit Dynamic el análisis de los desplazamientos y velocidades son calculados a partir de cantidades que son conocidas en el principio de cada intervalo. Esto se traduce a un ahorro del costo computacional debido a que las matrices de rigidez no se tienen que calcular e invertir en cada intervalo. [14]

Después crearemos un Field output request. Los datos sobre las variables que seleccionemos (*Ilustración 18*) se almacenarán en nuestro disco duro y nos mostrarán los resultados del modelo introducido en Abaqus. Estos datos los podremos ver en el módulo de Visualization de Abaqus sobre la simulación de nuestro impacto, en la deformada de nuestro modelo o en gráficas. Como observamos en la Ilustración 18, elegimos un total de 30 intervalos durante todo nuestro Step, aunque también se podrá definir que se guarden los resultados cada cierto espacio de tiempo. [15]

En el Field output request no conviene definir gran número de intervalos, estos ocuparán mucho espacio por almacenar distintas variables de todos los nodos de nuestro modelo.

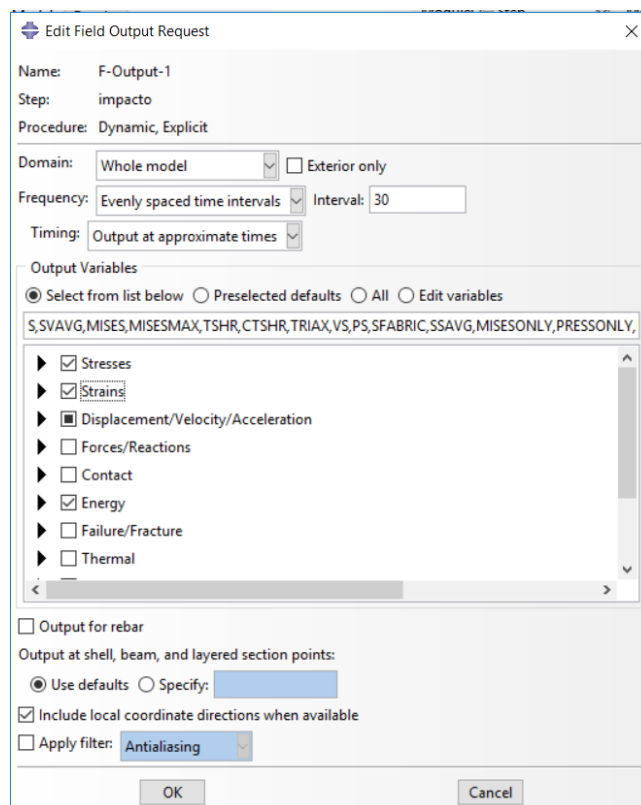


Ilustración 18: Creación de Field Output Request, Intervalos y variables seleccionadas

Para un análisis más intensivo de una variable, hemos utilizado el History Output request. En este almacenamiento de resultados hemos guardado los desplazamientos, velocidades y aceleraciones del centro de gravedad de nuestro prisma, durante todo el ensayo. En la Ilustración 19 podemos ver que el número de intervalos escogido ha ascendido hasta 20000. De esta manera nos aseguraremos un resultado fiable, en el que no nos hayamos saltado algún intervalo importante en la simulación. Estos datos se almacenarán en tablas numéricas por lo que el gasto computacional y de memoria será mucho menor que para un Field output request con el mismo número de intervalos.

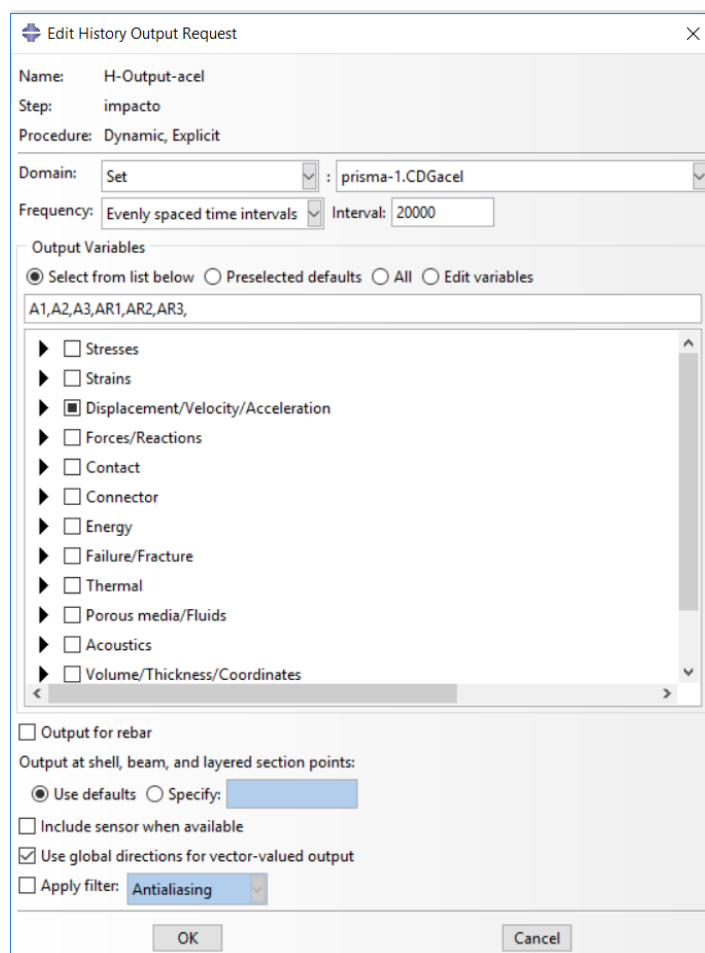


Ilustración 19: Creación de History Output Request, intervalos y variables seleccionadas

En Interaction crearemos las condiciones de las cavidades para el fluido utilizado en los airbags y los contactos

Las condiciones del contacto han sido definidas tomando el contacto normal con la variante “Hardcontact”, mientras que el contacto tangencial se tomará con una penalización de 0.2, de tal manera que se disipe energía en este. La energía se disipará mediante rozamiento entre la superficie de los airbags y la superficie de Marte.

Para la definición de las fluid cavity que constituirán los airbags en nuestro ensayo en primer lugar debemos escoger un Reference Point en nuestra parte y definir una superficie interna en la que quedará encerrado el aire. Hemos introducido el valor de la presión en Marte como 0 debido a las grandes diferencias de presión entre nuestro airbag y el exterior (*Ilustración 20*).

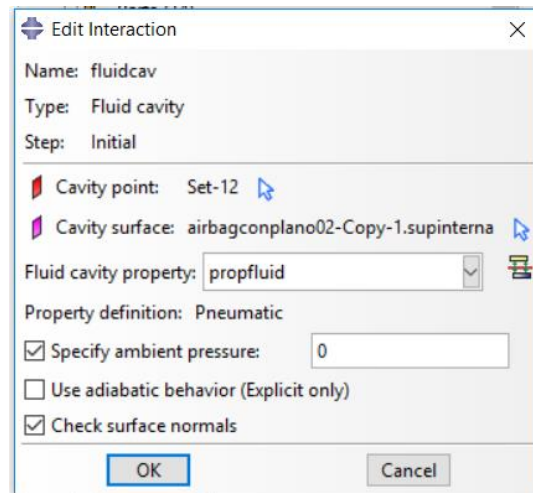


Ilustración 20: Selección de punto de la cavity, superficie interior y presión ambiente

La definición de un superficie interna es un paso muy importante en el diseño. En nuestro caso en las geometrías con una sola cavidad fluida hemos tenido problemas debido a la dificultad para identificar las superficies que constituían la superficie externa y las superficies que constituían la superficie interna (*Ilustración 21*).

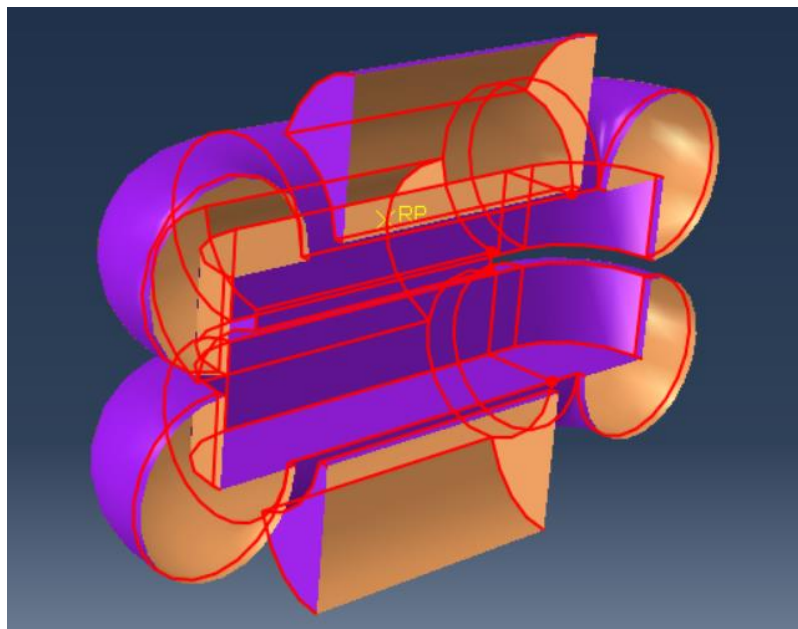


Ilustración 21: Elección de la superficie externa e interna de airbag con una cavidad fluida

Además, dentro de este módulo, definiremos las restricciones o constraints. En estas constraints indicaremos el mecanismo de unión entre el cubo y los airbags. Esta se hará mediante ties entre superficies coincidentes entre el cubo y los airbags. La utilidad de esto es mantener las superficies seleccionadas unidas durante la simulación, también puede hacerse mediante nodos.

Aquí definiremos el prisma como sólido rígido de tal manera que si choca con el suelo no se deforme y obtengamos un pico de aceleración que nos indique el fallo de este ensayo. En la realidad, aunque el prisma no sería indeformable, no se admitiría su contacto con otra superficie por los daños que se pudiesen ocasionar.

Por último realizaremos el mallado del sistema. Para el prisma utilizaremos elementos de tipo C3D8R, elementos tipo brick de integración reducida con control hourglass. En el mallado de los airbags utilizaremos elementos tipo M3D4R, elementos cuadriláteros de 4 nodos e integración reducida con control hourglass (*Ilustración 22*). [16]

En el apartado de resultados hemos realizado el análisis de convergencia de la malla. El valor obtenido en este análisis lo utilizaremos para definir el tamaño de la red de los elementos en la casilla seed.

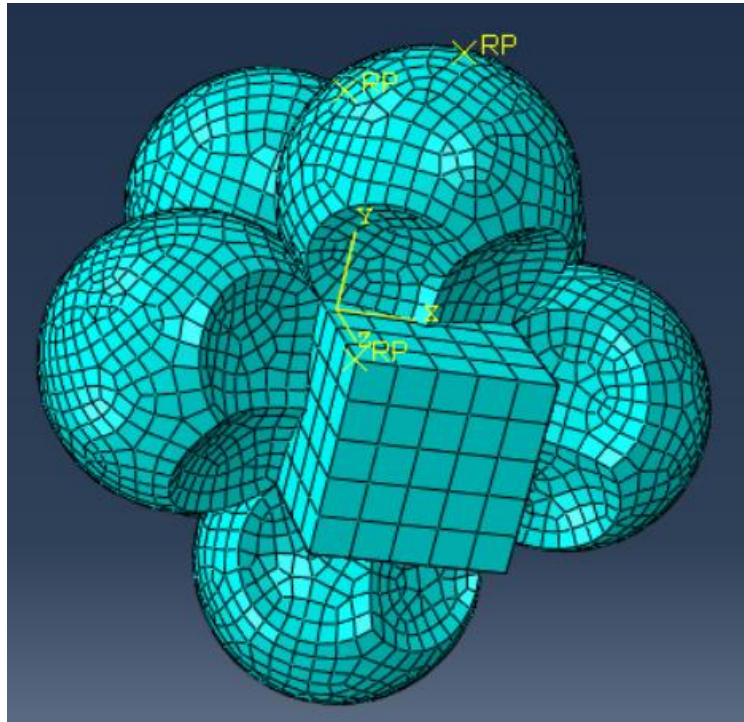


Ilustración 22: Diferencias entre los elementos de la malla entre airbag y prisma

Una vez ejecutados los cálculos Abaqus nos mostrará los resultados con su postprocesador. En este módulo podremos ver la simulación completa de nuestro proceso y los resultados numéricos obtenidos para las variables seleccionadas.

4. Análisis de los resultados obtenidos

4.1. Comentarios previos

En esta parte van a ser definidas las configuraciones que se han ido desarrollando. Comentaremos los resultados obtenidos, así como las posibles mejoras y fallos que nos han ido apareciendo en nuestro proceso de optimización.

Para la evolución de los modelos consideraremos el valor de las aceleraciones como el parámetro más importante y por límite de aceleración cogeremos 500 m/s^2 . Atendiendo a la finalidad del trabajo que se presenta, el límite de aceleración que se expone tiene un carácter orientativo.

Las tensiones evaluadas en las membranas que conforman los airbags son del orden de 20 Megapascals (*Ilustración 23*) no superando el límite elástico de materiales estructurales utilizados para este tipo de aplicaciones, como por ejemplo kevlar, cuya tensión de rotura está en torno a 1 GPa (*Ilustración 24*).

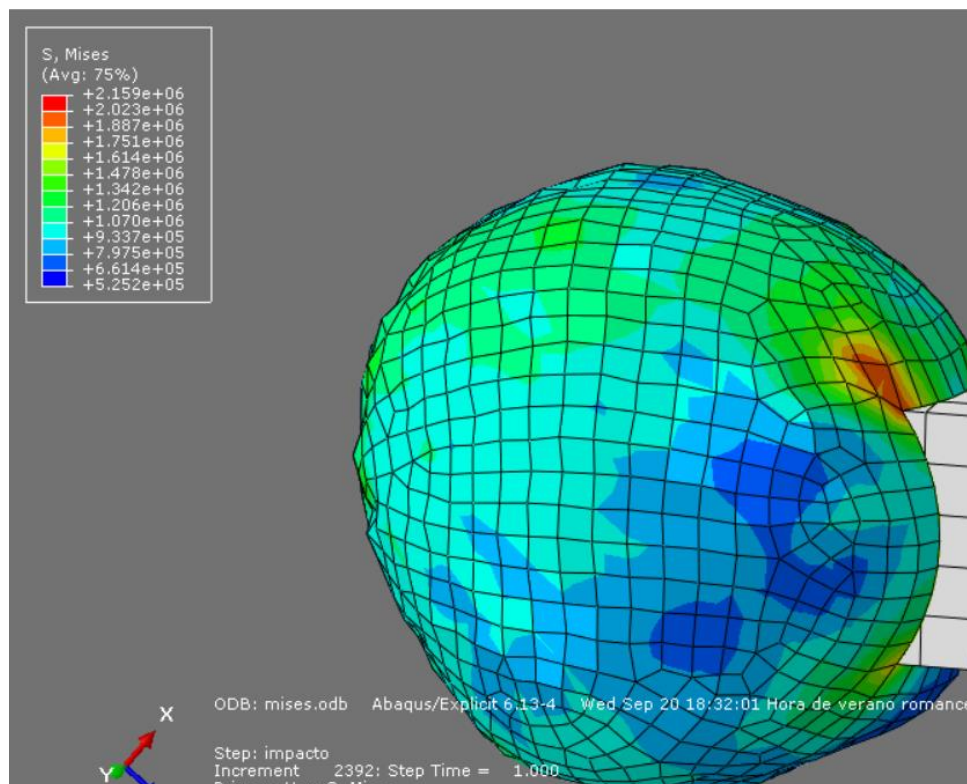


Ilustración 23: Tensión de Von Mises en el impacto de airbag

Material	Density (g/cm ³)	Tensile Strength (GPa)	Specific Strength (km*)	Tensile Modulus (GPa)	Specific Modulus (km**)
Vectran™ NT	1.4	1.1	79	52	3,700
Vectran™ HT	1.4	3.2	229	75	5,300
Vectran™ UM	1.4	3.0	215	103	7,400
Titanium	4.5	1.3	29	110	2,500
Stainless Steel	7.9	2.0	26	210	2,700
Aluminum	2.8	0.6	22	70	2,600

Ilustración 24: tabla de propiedades mecánicas (k)

En estas simulaciones vemos cómo, dependiendo del modelo, las geometrías se deforman en mayor o menor medida perdiendo la geometría inicial, debido a las presiones existentes en su interior. En la realidad habría varias maneras de solventar esto, nosotros hemos optado por meter una tensión en la superficie del airbag que mantenga en todo lo posible la geometría creada.

El valor de esta tensión a la que hemos sometido la membrana la hemos obtenido realizando un corte en una esfera sometida a presión (*Ecuación 1*).

La ecuación de equilibrio de esta esfera será:

$$2 \cdot \pi \cdot R \cdot e \cdot \sigma_{\theta} = P \cdot \pi \cdot R^2$$

Ecuación 1

$$\sigma_{\theta} = \frac{P \cdot \pi \cdot R^2}{2 \cdot \pi \cdot R \cdot e} = \frac{P \cdot R}{2 \cdot e}$$

Ecuación 2

Siendo:

σ_θ , el valor de la pretensión inicial para que la esfera conserve su geometría inicial cuando se le somete a una presión interna.

P, presión interna

R, radio de la esfera

E, espesor de la membrana

Para un valor de radio 1 metro, presión 10000 Pascales y espesor de 0.01 metros de pared, se obtiene una presión de:

$$\sigma_\theta = \frac{P \cdot R}{2 \cdot e} = \frac{10000 \cdot 1}{2 \cdot 0.01} = 500,000 \text{ Pascales}$$

Ecuación 3

Al introducir este valor en Abaqus, en el apartado load, stress, y ejecutar el ensayo, observamos que la esfera mantendrá su forma al presurizarse.

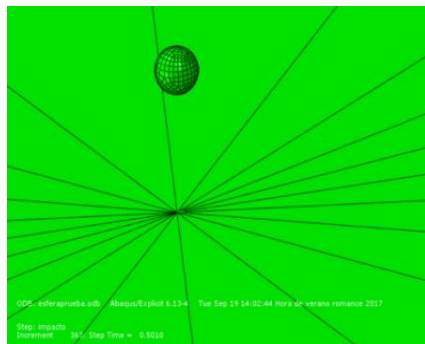


Ilustración 25: Esfera presurizada en tiempo 0,5 s

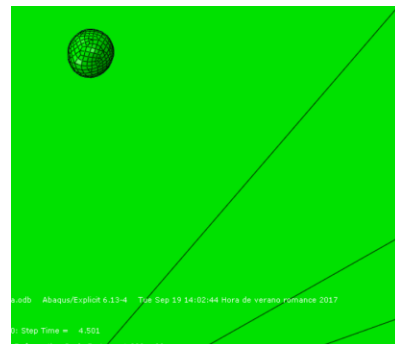


Ilustración 26: Esfera presurizada en tiempo 4,5s

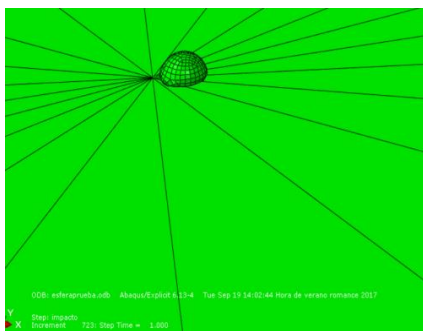


Ilustración 27: Esfera presurizada en tiempo

1s

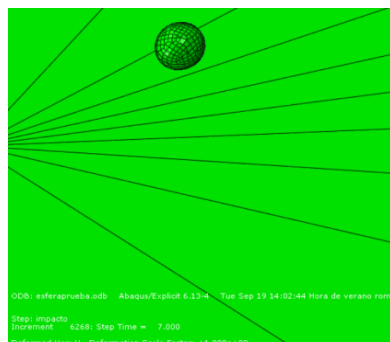


Ilustración 28: Esfera presurizada en tiempo

7s

Realizaremos estos cálculos para cada presión y cada modelo, de esta manera podremos minimizar la distorsión de nuestra geometría al presurizarla. En el caso de esta esfera, al ser una geometría simple, mantendrá perfectamente la forma. En contraposición, hemos de destacar que nuestros modelos, al no contar con estas características, no mantendrán su forma inicial sino que tenderán a expandirse. No obstante, no lo harán en la misma medida que lo hubiesen hecho sin esta pretensión inicial.

En el estudio a realizar lanzaremos el conjunto de airbags desde 5 metros de altura a distintas velocidades y presiones e iremos viendo de qué manera se van comportando. Como primera aproximación estudiaremos únicamente el primer bote, ya que es el que mayor energía tiene que disipar, así como el que a mayor velocidad se produce.

Para ciertos modelos seleccionados veremos cómo se comportan si los encerramos dentro de una geometría de paredes rígidas quitando la gravedad para estudiar el caso lo más aleatoriamente posible (*Ilustración 29*).

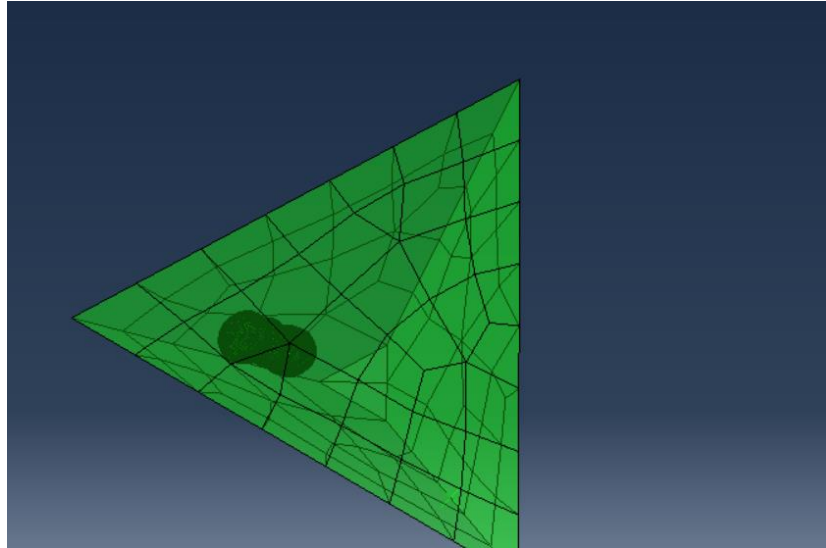


Ilustración 29: Geometría paredes rígidas en las que comprobaremos distintos ángulos de impacto.

En este apartado evaluaremos las aceleraciones en los distintos ejes mediante gráficas (*Ilustración 30*) obtenidas a partir del postprocesador de Abaqus, eligiendo el centro de gravedad del prisma como punto de estudio.

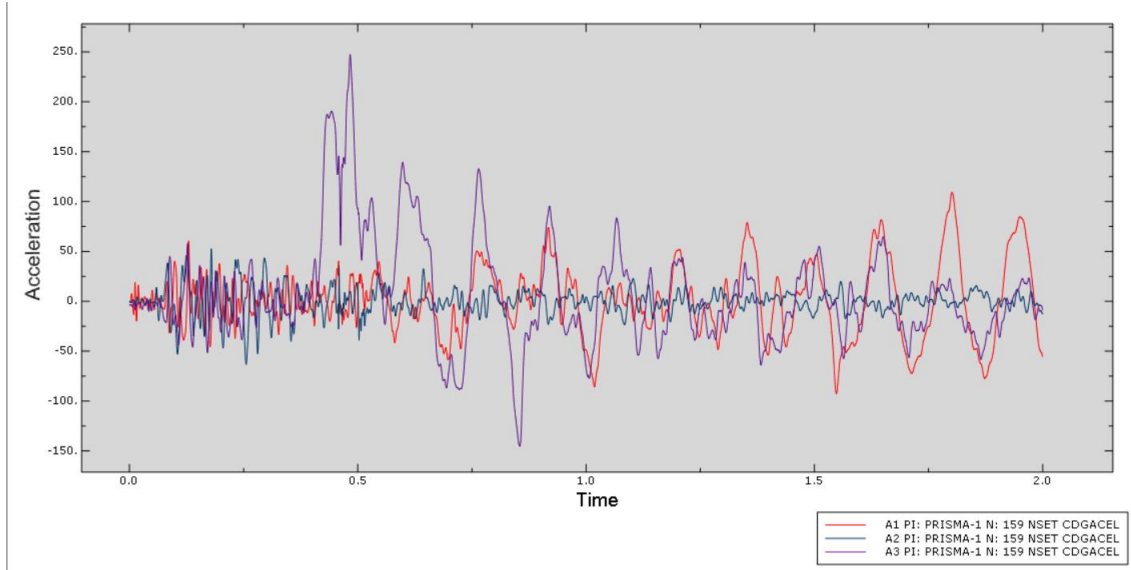


Ilustración 30: Gráfica aceleraciones obtenida del History Output de Abaqus

Al comenzar el trabajo, escogimos un valor de 0.1s de espacio entre intervalos en el History output, haciendo un total de 200 intervalos para 2 segundos de simulación, dentro del módulo Step. Después de realizar los modelos pudimos observar como los resultados

no seguían ningún tipo de lógica, airbags con mucho volumen daban peor resultado que otros modelos diseñados con menor volumen. Esto nos llevó a sacar conclusiones erróneas.

Tras revisar los modelos decidimos aumentar el número de intervalos reduciendo el espacio entre ellos a 0.0001s. Comparando las gráficas obtenidas para los mismos modelos con las mismas condiciones vimos como el número de intervalos en los primeros ensayos realizados era muy pequeño, perdiendo una gran cantidad de datos. (*Ilustración 31 e Ilustración 32*)

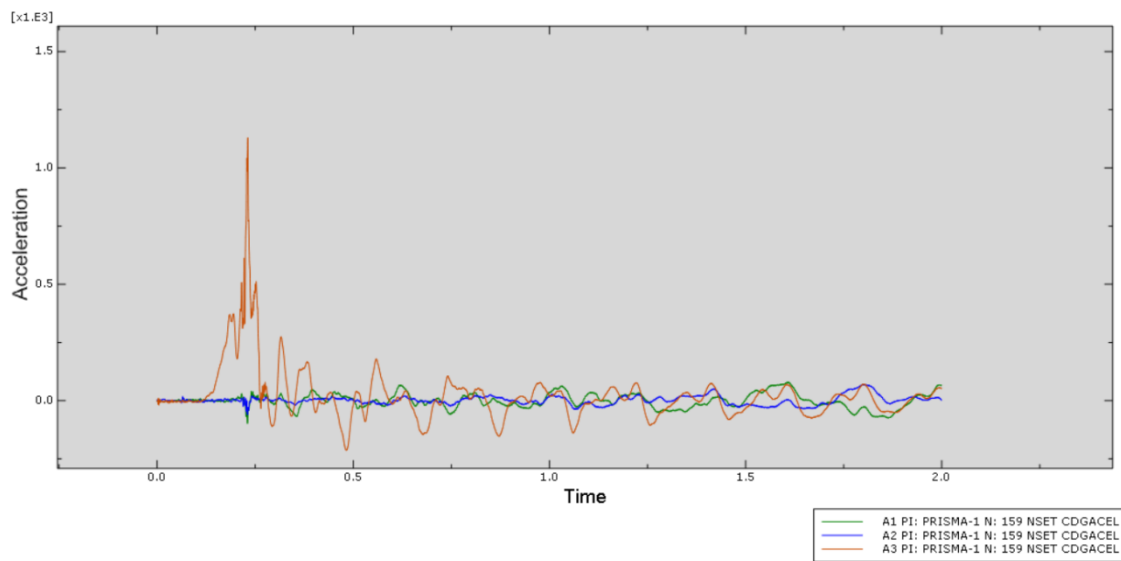


Ilustración 31: History output con espacio con 20000 intervalos. Muestra mayor número de datos para un mismo ensayo y modelo

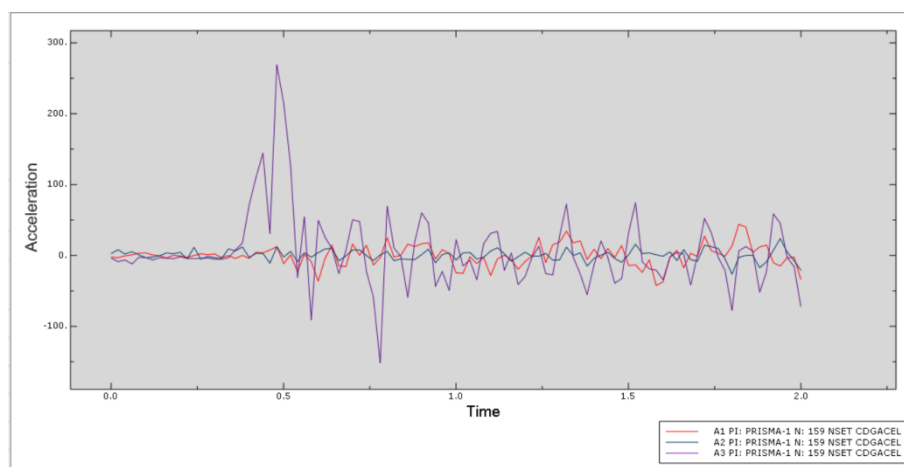


Ilustración 32: History Output con 200 intervalos. Omisión de intervalos importantes en los resultados

Para todos los modelos presentaremos una tabla (*Tabla 1*) con el valor de la velocidad en los tres ejes, el módulo de la velocidad, la presión de ese modelo y el resultado obtenido en la aceleración.

$$\text{Módulo de velocidad} = \sqrt{25^2 + 0^2 + 25^2} = 36.35 \frac{m}{s}$$

Ecuación 4

En esta tabla se han ordenado los ensayos de manera ascendente atendiendo a las presiones. En el caso de que la presión coincida se utilizará el módulo de velocidad.

Ej.: velocidad en ejes x, y, z (m/s)=25, 0,-25

	Velocidad inicial(x, y, z) m/s	Módulo velocidad m/s	Presión kPa	Aceleración m/s ²
Ensayo 1	3,0,-4	5	50	100
Ensayo 2	3,0,-8	8.45	50	150
Ensayo 3	3,0,-10	10.44	50	1500
Ensayo 4	3,0,-10	10.44	60	600
Ensayo 5	3,0,-10	10.44	75	250

Tabla 1: Ejemplo de las tablas en las que vamos a dar los resultados. Se mostrarán velocidad, módulo, presión y aceleración de cada ensayo

4.2. Análisis de convergencia

En el primer modelo, al hacer el mallado aprovecharemos para realizar un análisis de convergencia. En él cogeremos el resultado de una variable definiendo unas condiciones que se mantendrán constantes en todos los ensayos. Lo único que se variará de un ensayo a otro será el número de elementos de la malla en un airbag.

En nuestro caso realizamos el ensayo para una presión de 10000 Pa, con una velocidad de -2 m/s en el eje z a una distancia de la superficie de Marte de 1 metro. Al realizar lo con los mismos datos el resultado de nuestra variable debería ser el mismo pero el tamaño de los elementos variarán el resultado.

Por lo tanto, intentaremos llegar a un tamaño de malla en el que el resultado no varíe demasiado, en el que se mantenga prácticamente constante. De tal manera que si seguimos subiendo el número de elementos no obtengamos cambios en nuestra variable. De este modo podremos decidir el tamaño de malla que daremos al modelo asegurando un resultado fiable, reduciendo en todo lo posible el gasto computacional para la convergencia del resultado.

En nuestro caso la variable a estudiar es la máxima tensión de Von Mises para el tiempo de 0.5 s. En la siguiente tabla se recogen los resultados obtenidos para un distinto número de elementos (

Tabla 2).

Número de elementos	Tensión de Von Mises (MPa)
759	2.320
1386	2.573
1670	2.847
2962	3.134
4700	3.328
6680	3.340
8478	3.452
9027	3.487
9556	3.495
9649	3.561
10237	3.506
10568	3.514
11006	3.461
11504	3.490
11758	3.501
12560	3.57

Tabla 2: Resultados del análisis de convergencia. Número de elementos y Tensión de Von Mises

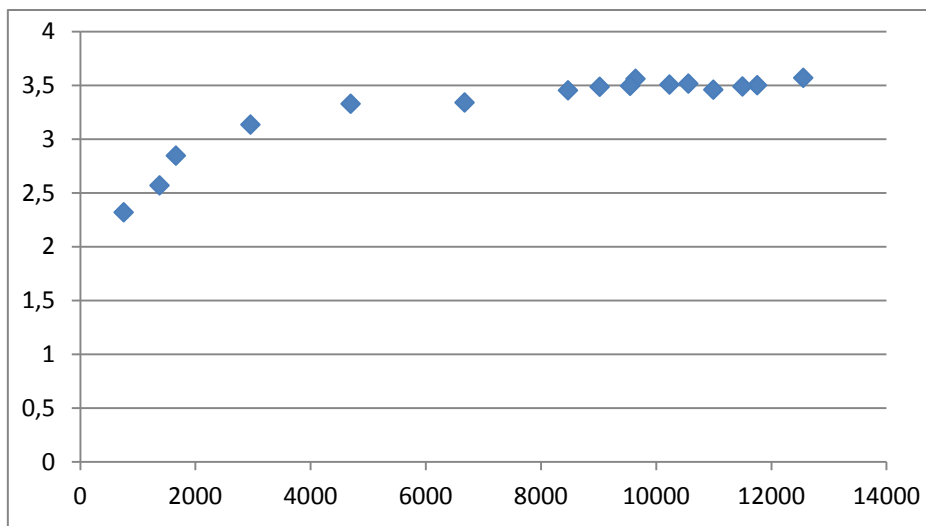


Ilustración 33: Gráfica: número de elementos vs tensión de Von Mises del análisis de convergencia

Vemos que a partir de 8500 elementos, el valor de la tensión de Von Mises alcanza un valor casi constante (*Ilustración 33*), por lo que utilizar mayor número de elementos en los análisis no supondrá un cambio significativo en nuestros resultados. Sin embargo podemos ver como los resultados varían considerablemente si cogemos un tamaño de malla mayor.

En cuanto al análisis de convergencia temporal se encarga de realizarlo Abaqus automáticamente. Va evaluando los resultados obtenidos intervalo a intervalo, considerando o no si debe aumentar los intervalos en los que calcular resultados. Los demás valores los dejaremos como muestra la Ilustración 34.

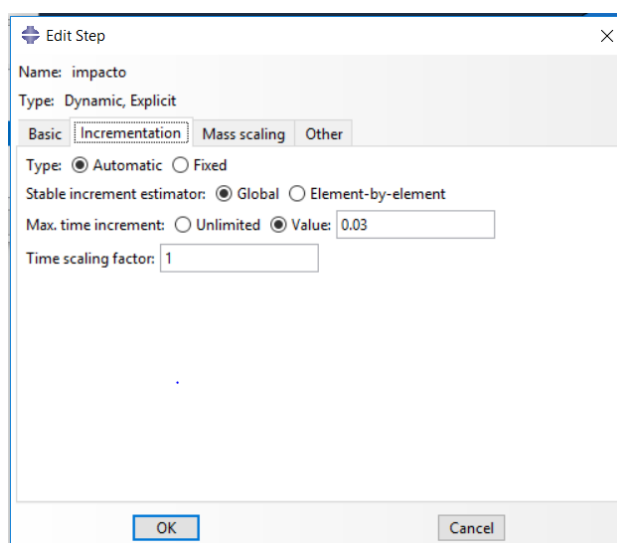


Ilustración 34: Convergencia temporal automática realizada por Abaqus. Valores introducidos

Abaqus además crea una energía externa que le ayudará a resolver las ecuaciones planteadas: Viscous dissipation. La dejaremos por defecto cómo muestra la Ilustración 35.

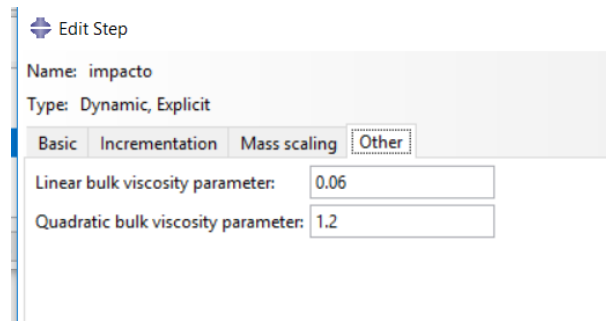


Ilustración 35: Parámetros bulk viscosity introducidos

En ciertos modelos que consideremos de utilidad por conseguir buenos resultados y recubrir el airbag de una manera completa aportaremos, a parte del volumen de aire, el área de material de airbag necesario para su construcción.

4.3. Modelo 1

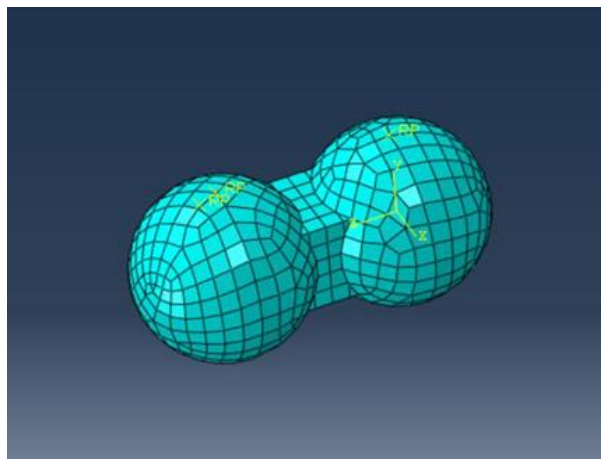


Ilustración 36: Primer modelo

Para empezar con los diseños hemos elegido un modelo sencillo formado por dos esferas. Como se puede observar en la Ilustración 36, el centro queda desprotegido de los airbags

que hemos incorporado en este diseño. Esto no supone un problema a la hora de estudiarlo ya que nos fijaremos únicamente en el primer bote. En él la superficie desprotegida no impactará contra el suelo.

Cada una de las esferas miden 1 metro de radio y sus centros están situados a 1 metro del centro del prisma. El volumen de 1 esfera es de 3.28 m^3 , mientras que el volumen total de ambas esferas será 6.56 m^3 . En la Ilustración 37 se muestran algunas cotas de interés.

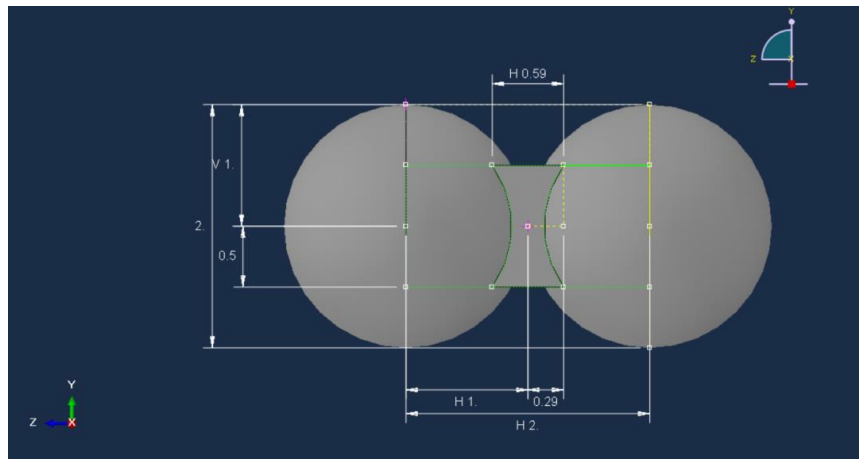


Ilustración 37: Modelo 1- cotas interés

En la Tabla 3 se muestran los resultados a los ensayos realizados para este modelo.

	Velocidad inicial(x, y, z)m/s	Módulo velocidad m/s	Presión kPa	Aceleración m/s ²
Ensayo 1	3,0,-4	5	50	100
Ensayo 2	3,0,-8	8.45	50	150
Ensayo 3	3,0,-10	10.44	50	1500
Ensayo 4	3,0,-10	10.44	60	600
Ensayo 5	3,0,-10	10.44	75	250

Tabla 3: Resultados modelo 1

En el primer y en el segundo ensayo esta configuración resiste perfectamente el impacto, incluso podemos observar que aún queda un espacio de seguridad para que la cápsula toque con el suelo en el momento en que estos se encuentren en el punto más cercano (*Ilustración 38*).

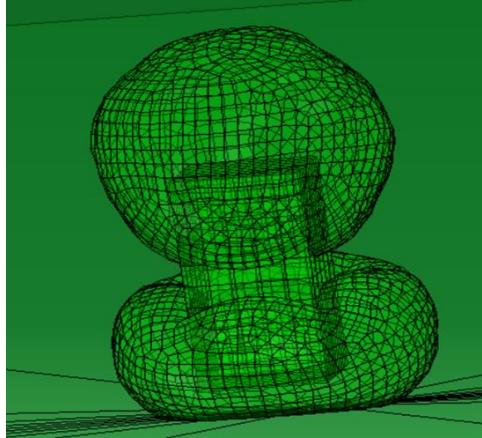


Ilustración 38: Ensayo 1-modelo 1. Espacio entre cápsula y suelo

En el ensayo 3 subiremos la velocidad en el eje z hasta -10 m/s, obteniendo un resultado de 1500 m/s^2 . Esta aceleración es extrañamente alta comparada con los resultados obtenidos anteriormente, lo que nos hace pensar que ha habido contacto entre el prisma y el suelo de Marte (*Ilustración 39*).

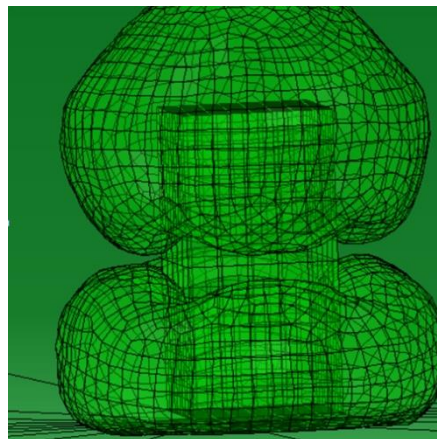


Ilustración 39: Ensayo 2-modelo 1. Espacio entre cápsula y suelo muy reducido

En el ensayo 4 y 5 hemos probado a subir la presión hasta el valor 60000 Pa y 75000 Pa respectivamente y al realizar el ensayo obtenemos un valor de aceleración de 600 y 250 m/s^2 .

En el ensayo 4 se produce una aceleración por encima de la que hemos marcado como límite, por lo que decidimos subir la presión hasta 75 kPa para conseguir mayor amortiguación ya que se produce choque contra la superficie por parte del prisma, aunque por el resultado podemos ver que es leve.

En el quinto ensayo obtenemos un valor de 250 m/s^2 para un módulo de velocidad de 10.44 m/s .

En el siguiente caso buscaremos aumentar el volumen de airbag para que sea capaz de amortiguar mayores velocidades con las mismas presiones.

4.4. Modelo 2

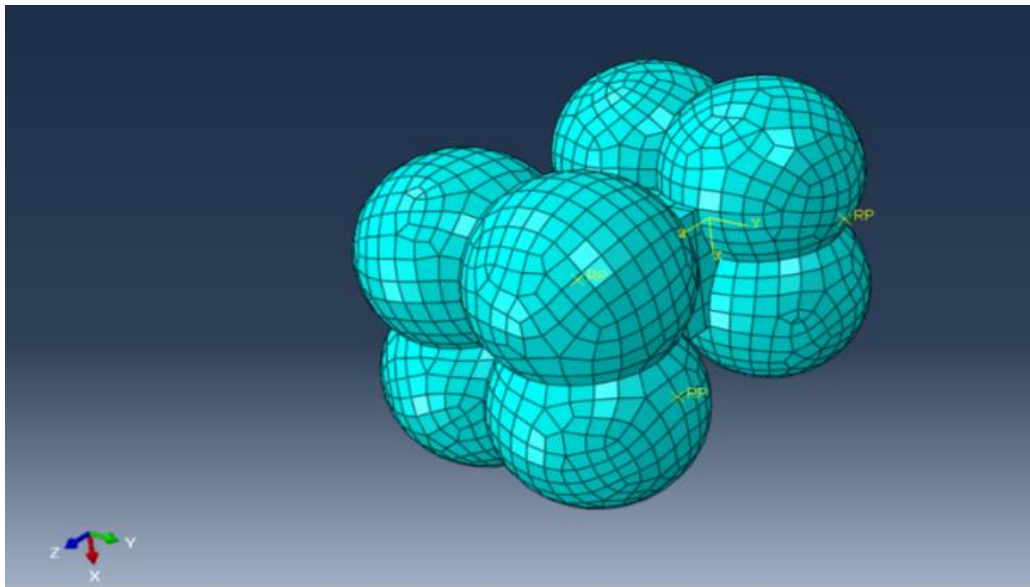


Ilustración 40: Modelo 2

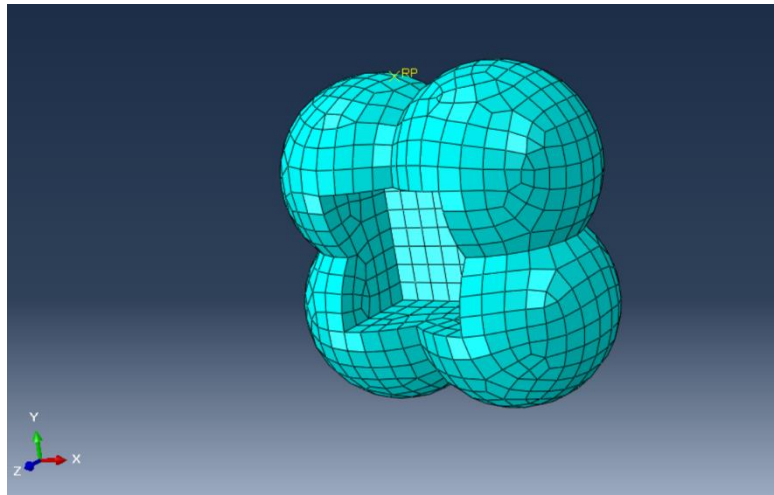


Ilustración 41: Airbag modelo 2 superficie coincidente con el prisma

Cómo podemos ver en la Ilustración 40, este conjunto está formado por dos fluid cavity, al igual que el modelo anterior, esto quiere decir que las cuatro esferas que componen cada esfera se comunican entre sí. Para optimizar el volumen de cada airbag se han juntado cuatro esferas consiguiendo un volumen total hasta 10.8 m^3 .

Estas esferas tienen un radio de 0.75 m y cada centro de la esfera se encuentra a la distancia de un metro de la esfera contigua (Ilustración 42). Una vez creado el conjunto de esferas se ha realizado una cavidad para que se acople bien con el prisma que debe proteger (Ilustración 41).

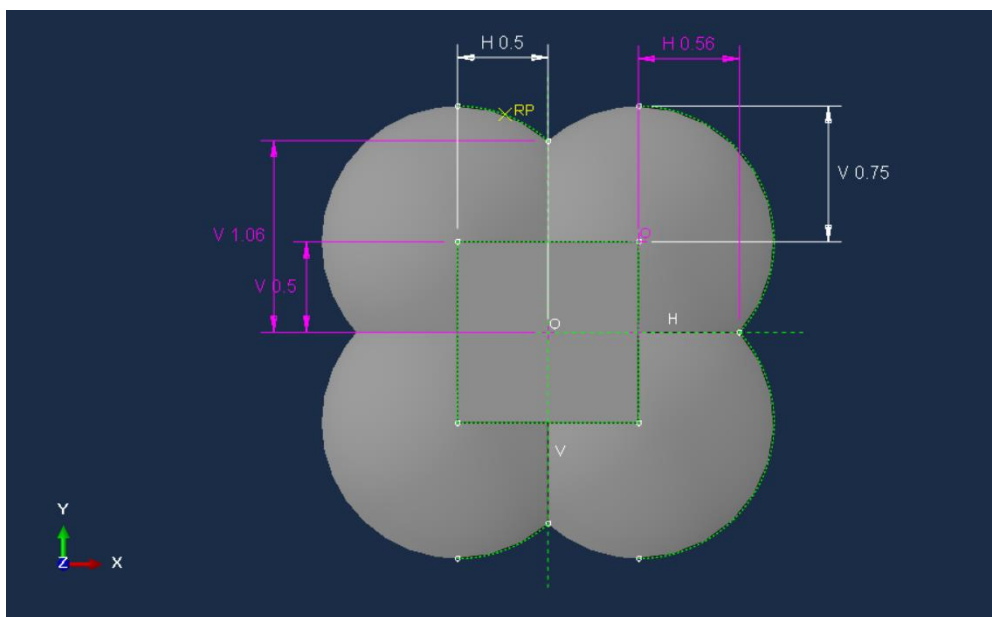


Ilustración 42: Cotas de interés modelo 2

En la Tabla 4 se muestran los resultados a los ensayos realizados para este modelo.

	Velocidad inicial(x, y, z) m/s	Módulo velocidad m/s	Presión kPa	Aceleración m/s²
Ensayo 1	3,0,-5	5.83	30	200
Ensayo 2	2,0,-8	8.25	30	900
Ensayo 3	3,0,-15	15.30	65	2500
Ensayo 4	5,0,-15	15.81	75	500
Ensayo 5	5,0,-20	20.61	90	4000
Ensayo 6	10,0,-18	20.59	150	800
Ensayo 7	10,0,-20	22.36	200	850

Tabla 4: Resultados modelo 2

El primer ensayo ha resistido bien el impacto, al igual que el primer modelo, por eso hemos optado por subir la velocidad de impacto en el segundo ensayo hasta 8.25 m/s. En este ensayo se ha obtenido una aceleración muy elevada, por lo que decidimos aumentar la presión.

Análogo al aumento de presión hemos realizado aumento de velocidades, con el fin de llegar a una velocidad de impacto mayor. El único resultado positivo se consiguió a presión de 75 kPa con módulo de velocidad de 15.81 m/s. Esto supone una mejora con respecto del modelo anterior, ya que este no era capaz de resistir con esta presión un impacto de menor módulo de velocidad.

En cuanto a los ensayos posteriores observamos cómo este modelo no aguanta los impactos a una mayor presión para las velocidades establecidas.

En los dos primeros modelos hemos estudiado dos fluid cavity separadas, en el siguiente modelo comprobaré cómo se comporta el modelo si solo tenemos una fluid cavity, es decir, el volumen de aire se comparte por todo el airbag. Al estar todo el aire en contacto,

habrá un mayor volumen dentro de una misma cavidad y por tanto habrá un mayor número de partículas que participarán en el intercambio de energía.

4.5. Modelo 3

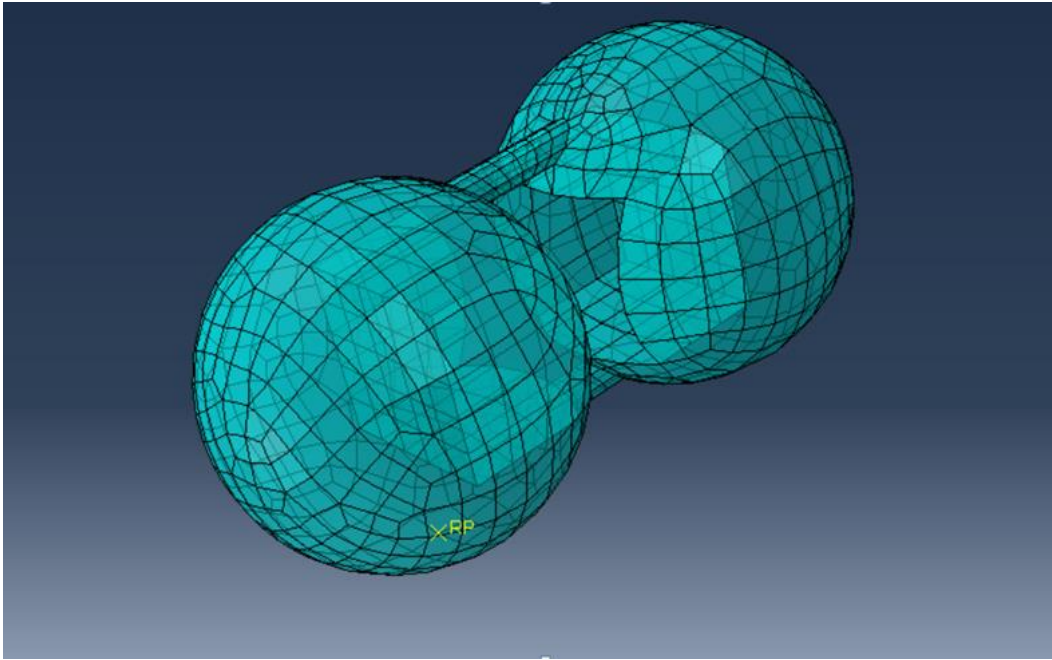


Ilustración 43: Modelo 3

Teniendo como referencia el primer modelo hemos añadido 2 tubos que hacen que comuniquen las dos cavidades, a fin de estudiar el comportamiento de este nuevo modelo (*Ilustración 43*).

Las dos esferas laterales tienen un radio de un metro al igual que en primer ensayo, mientras que los conductos miden 0.1 m de radio y presentan una longitud máxima de 0.8 m y una mínima de 0.4 m (*Ilustración 44*).

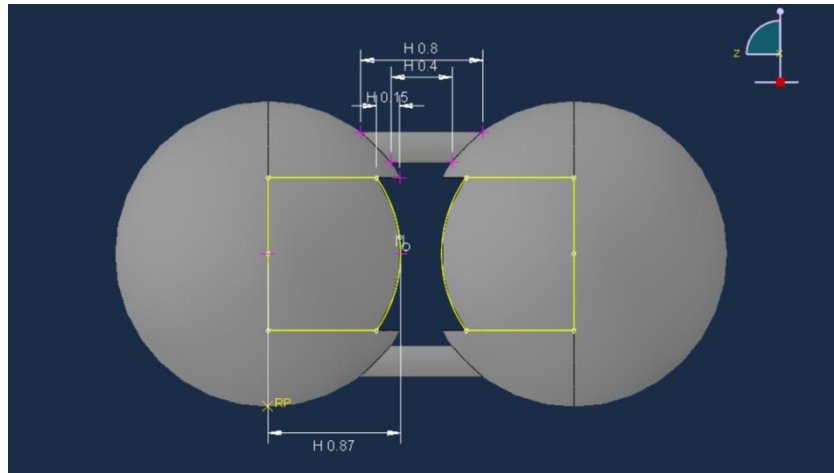


Ilustración 44: Cotas de interés modelo 3

En la Tabla 5 se muestran los resultados a los ensayos realizados para este modelo.

	Velocidad inicial(x ,y, z) m/s	Módulo velocidad m/s	Presión kPa	Aceleración m/s²
Ensayo 1	3,0,-8	8.45	30	1500
Ensayo 2	3,0,-4	5	50	80
Ensayo 3	3,0,-8	8.45	50	350
Ensayo 4	3,0,-10	10.44	60	1000
Ensayo 5	3,0,-10	10.44	75	200
Ensayo 6	3,0,-15	15.30	90	3000
Ensayo 7	10,0,-18	20.59	150	8000
Ensayo 8	10,0,-20	22.36	200	10000

Tabla 5: Resultados modelo 3

Este modelo se comparará con el primero para ver sus ventajas y desventajas. La elección de ambos se basa en la similitud de su geometría.

En los ensayos realizados a presión de 50 kPa no se observa diferencia alguna, ambos modelos aguantan el impacto a las velocidades ensayadas. Aumentando la presión hasta 60

kPa y subiendo la velocidad del eje z hasta -10 m/s, obtenemos un resultado de impacto entre Marte y la cápsula que no sucedía en el modelo 1.

Tras esto, decidimos bajar la presión hasta 30 kPa, aunque este ensayo no lo realizamos en el primer modelo, si lo hicimos en el segundo, obteniendo un mal resultado. Para este y los demás modelos realizados a posterior, aumentaremos la presión por encima de los 100 kPa. Hemos decidido esto teniendo en cuenta que con presiones más elevadas se soportan mayores velocidades y así conseguiremos mayor variedad de resultados.

Los ensayos 6, 7 y 8 en los que se realizó a velocidades mayores a 15 m/s de módulo han dado un mal resultado como se puede ver en la Tabla 5: **Resultados modelo 3**.

Al obtener un resultado muy parecido entre esta configuración y las anteriores hemos decidido aumentar la capacidad de intercambio de aire entre los airbags.

4.6. Modelo 4

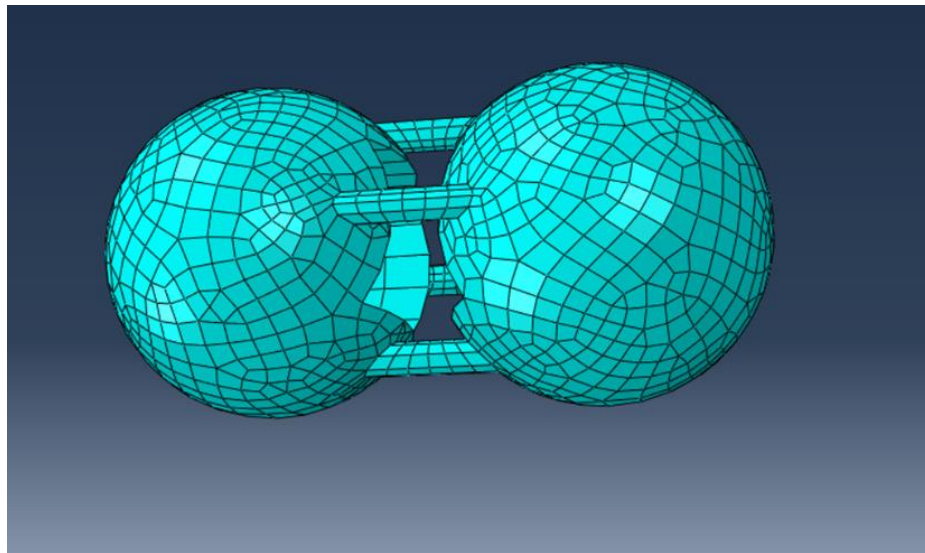


Ilustración 45: Modelo 4

En una primera instancia aumentamos el diámetro de los conductos, con esto el diseño se vio afectado y el programa reflejaba problemas al ejecutar sus cálculos. Con el objetivo de solventar este fallo cambiamos el aumento por la integración de dos conductos.

Dichos conductos cuentan con un de radio 0.1 m, presentan las mismas medidas que en el ensayo anterior y entre sus centros forman un ángulo de 90° como se indica en la Ilustración 46.

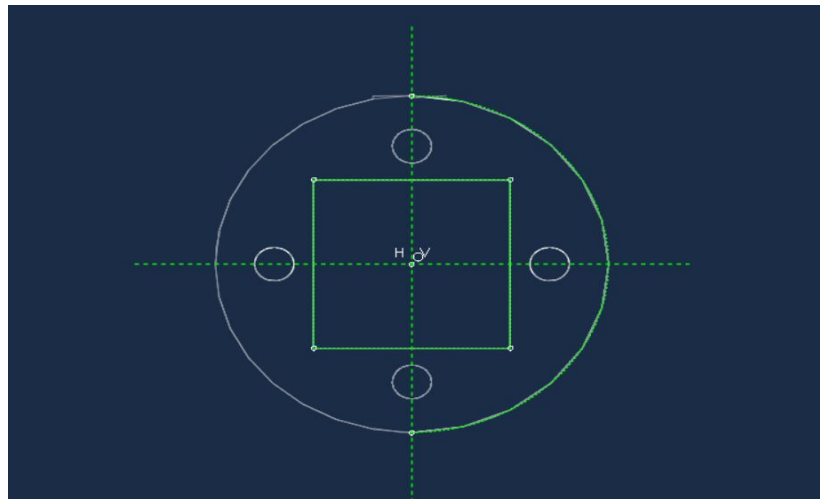


Ilustración 46: Sección modelo 4, disposición de los tubos

En la Tabla 6 se muestran los resultados a los ensayos realizados para este modelo.

	Velocidad inicial(x, y, z) m/s	Módulo velocidad m/s	Presión kPa	Aceleración m/s²
Ensayo 1	3,0,-4	5	50	100
Ensayo 2	3,0,-8	8.45	50	1000
Ensayo 3	3,0,-10	10.44	75	175

Tabla 6: Resultados modelo 4

En los ensayos 1 y 3 obtenemos resultados parecidos a los anteriores modelos, todos ellos amortiguan bien el impacto. En el ensayo 2 tenemos un deterioro de los resultados, produciéndose choque entre Marte y la cápsula.

Cómo no encontramos ninguna ventaja utilizando este sistema de conductos probaremos otra manera de crear solo una fluid cavity y comparar con un modelo similar pero sin que comparta aire entre los distintos airbags como hemos hecho entre este modelo y el primero.

Vamos a retomar el ensayo número 2, añadir unos airbag centrales y después hacer sólo un airbag para así poder concluir sobre los airbags con una sola cavidad. Queremos seguir evolucionando el modelo 2 porque es con el que hemos obtenido mejores resultados hasta ahora, pero no podemos utilizarlo como un modelo posible para una completa evaluación, ya que está desprotegido por el centro

4.7. Modelo 5

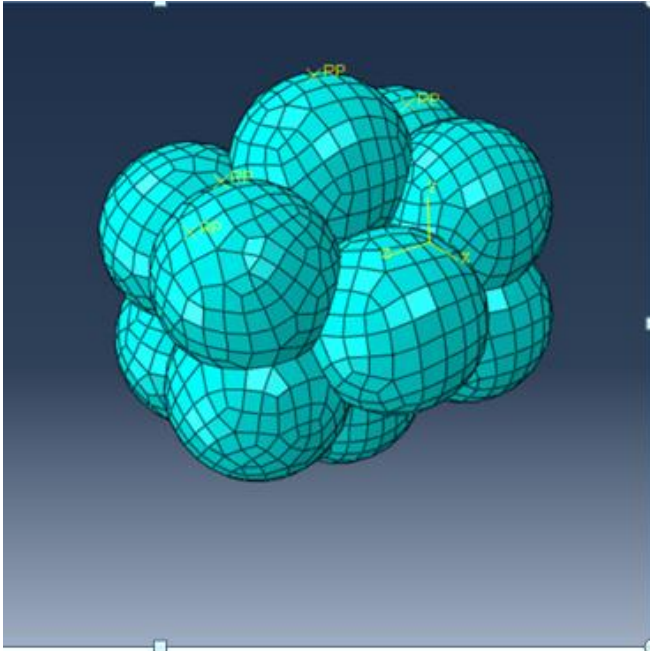


Ilustración 47: Modelo 5

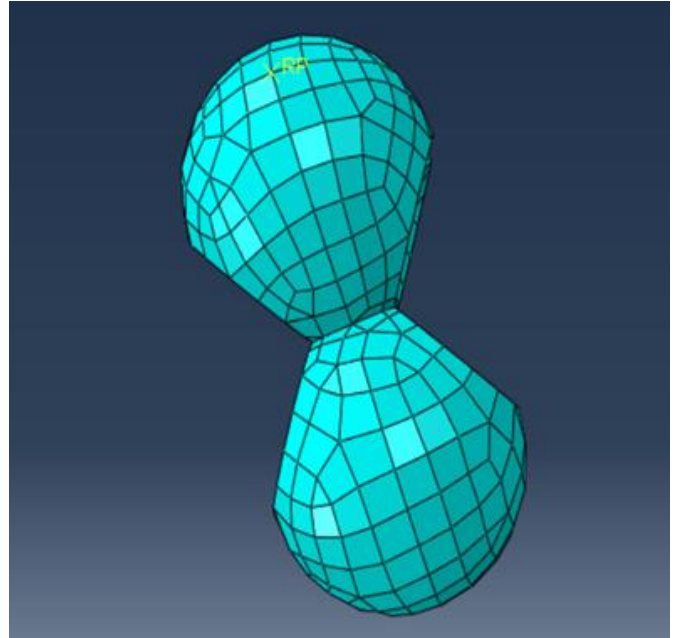


Ilustración 48: Modelo 5-2

Para este modelo hemos desarrollado un tercer airbag que se sitúa en el centro de los dos existentes. Este airbag central estará formado por cuatro esferas de radio 0.75 m en las que se han hecho las cavidades correspondientes para que quede un conjunto compacto que recubra en su totalidad al airbag. El volumen total del sistema de airbags asciende hasta los 16.17 m^3 .

Estas cavidades se han hecho mediante la sustracción de dos geometrías sólidas, convirtiéndose luego a una sección tipo Shell, ya que la construcción geométrica de estas sería muy complicada (*Ilustración 48*).

En la Tabla 7 se muestran los resultados a los ensayos realizados para este modelo.

	Velocidad inicial(x, y, z) m/s	Módulo velocidad m/s	Presión kPa	Aceleración m/s²
Ensayo 1	3,0,-8	8.45	30	575
Ensayo 2	3,0,-10	10.44	50	2500
Ensayo 3	5,0,-12	13	75	900
Ensayo 4	5,0,-15	15.81	75	5000
Ensayo 5	5,0,-20	20.61	75	7000
Ensayo 6	5,0,-20	20.61	90	6000
Ensayo 7	10,0,-20	22.36	200	400

Tabla 7: Resultados modelo 5

En este modelo se ha aumentado el volumen de aire, por lo que se podrá esperar alguna mejora en los resultados en comparación a los ensayos anteriores.

Con una presión de 30 kPa vemos cómo soporta bien el impacto para un módulo de velocidad de 8.45 m/s, pero si subimos la velocidad hasta 10.44 m/s y la presión hasta 50 kPa se produce fallo por contacto. Al subir la velocidad hasta 75 kPa y mediante tres ensayos a velocidades de 13 m/s, 15.81m/s y 20.61 m/s obtenemos malos resultados, lográndose aceleraciones muy elevadas.

En el ensayo 6 subimos la presión hasta 90 kPa manteniendo la velocidad del ensayo 5 con módulo 20.61m/s pero se sigue obteniendo aceleración muy alta.

Sin embargo en el último ensayo subimos la presión hasta 200 kPa, resistiendo este impacto con una aceleración aceptable de 400 m/s², esta velocidad no había sido resistida por ninguno de los modelos anteriores. En el segundo modelo se producía el contacto entre cápsula y superficie (*Ilustración 49*).

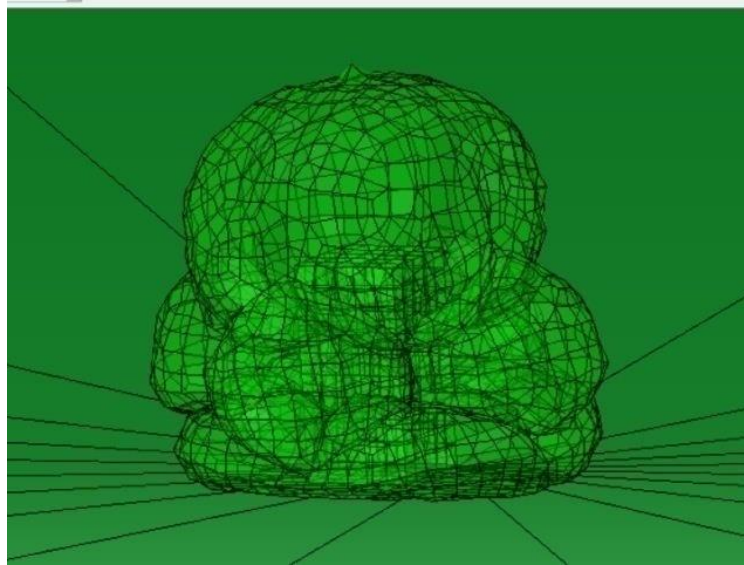


Ilustración 49: Impacto modelo 5. Impacto entre cápsula y superficie

Con el resultado de este ensayo podemos decir que al aumentar el volumen del airbag será más fácil aguantar impactos a alta presiones y altas velocidades para las geometrías con varias cavidades que hemos ensayado hasta ahora.

A continuación mantendremos la misma configuración y eliminaremos las paredes que limitan al fluido a circular por los distintos airbags. Esta será una nueva manera de compartir fluido entre cavidades, ya que con la anterior manera no se obtenía un buen resultado.

4.8. Modelo 6

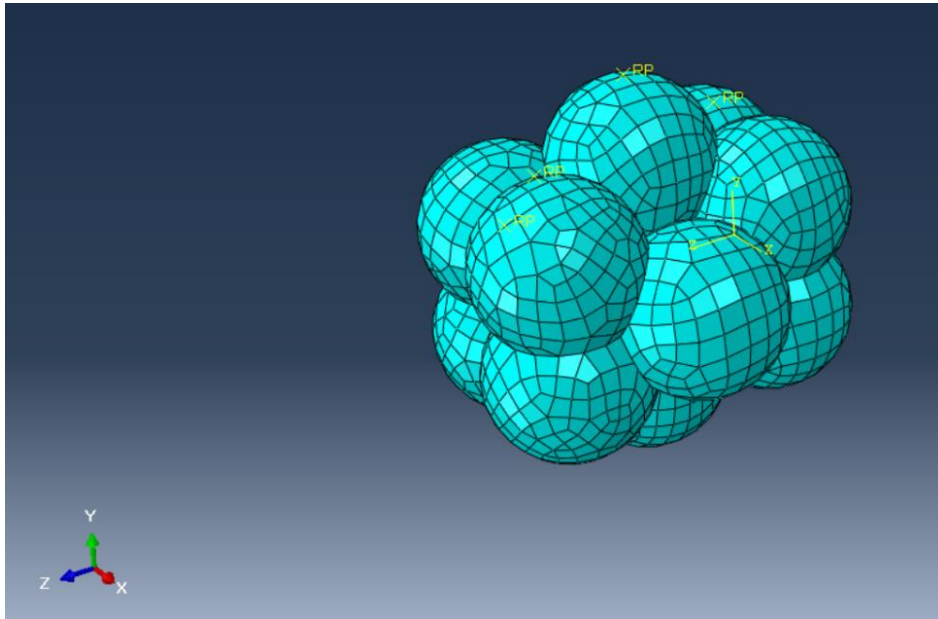


Ilustración 50: Modelo 6

Debido a las limitaciones de nuestro modelo en Abaqus nos hemos visto obligados a modelar esta geometría con uniones entre la cápsula y el airbag mediante puntos, no pudiendo realizarla mediante aristas coincidentes. Con este tipo de unión no podíamos definir el volumen de la cavidad por el problema de coincidencia de aristas en una misma superficie interna (*Ilustración 51*).

Nosotros no vamos a analizar las tensiones que se concentran en esta uniones simplemente analizaremos la aceleración del centro de gravedad del prisma y las imágenes del impacto ofrecidas por Abaqus.

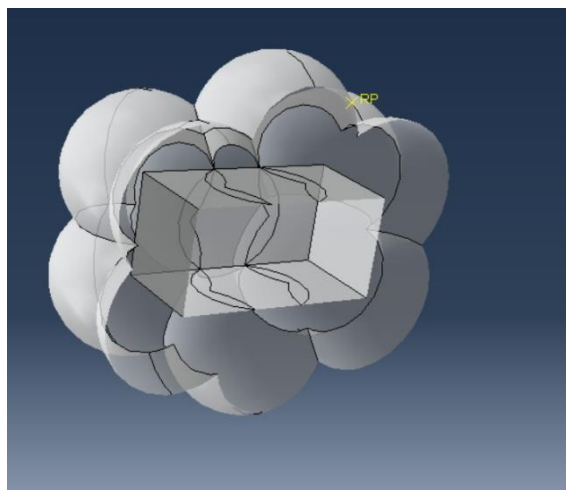


Ilustración 51: Modelo 6- uniones

En la Tabla 8 se muestran los resultados a los ensayos realizados para este modelo.

	Velocidad inicial(x, y, z) m/s	Módulo velocidad m/s	Presión kPa	Aceleración m/s²
Ensayo 1	3,0,-8	8.45	50	145
Ensayo 2	3,0,-10	10.44	45	choque
Ensayo 3	3,0,-10	10.44	50	choque
Ensayo 4	3,0,-15	15.30	75	choque

Tabla 8: Resultados modelo 6

Como podemos observar en la tabla solo hemos tenido buen resultado con una presión de 45 kPa y con una velocidad de -8 m/s en el eje z. Aunque es capaz de soportar el impacto, no es indicativo de nada. Todos los modelos anteriores aguantaron esta prueba aun teniendo menor volumen de fluido. En todas las demás se ha concluido con un choque.

Tras los malos resultados probaremos a aumentar más el volumen porque anteriormente habíamos conseguido buenos resultados con este método.

Ahora aprovecharemos para hacer una comparativa de la superficie de material necesario entre este modelo y el anterior, por tener una simetría similar. Este dato lo hemos mirado

en Abaqus, en la pestaña Query, mass properties. En el modelo 5 tenemos tres fluid cavity cuya suma de superficies hace un total de 68.33 m^2 . En el modelo 6 tenemos una superficie total de 53.01 m^2 (*Ilustración 52*). Vemos una clara diferencia en cuanto a la cantidad de material necesario. Esta diferencia aumentaría si dividimos la geometría en mayor número de cavidades. Por este motivo debemos controlar el número de cavidades, para que no ascienda el material necesario para su construcción.

```
Area of shell faces (one side only): 53.01  
Area centroid of shell faces: 4.03e-005,3.34e-005,1.000  
Volume: 1.59  
Volume centroid: 4.03e-005,3.34e-005,1.000  
Mass: 1698.39
```

Ilustración 52: Mass properties del modelo 6

4.9. Modelo 7

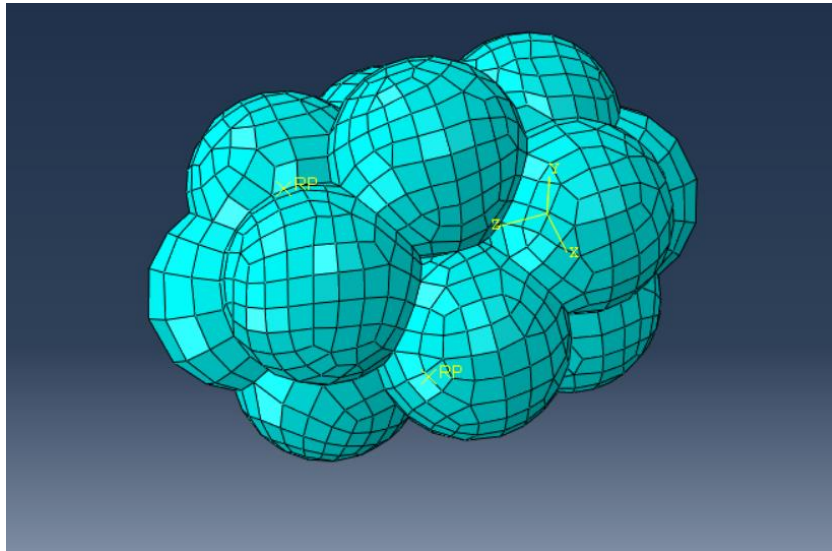


Ilustración 53: Modelo 7

En este modelo hemos añadido 2 esferas en los extremos del conjunto anterior, haciendo un total de 14. Estas tienen un radio de 0.75 m consiguiendo un volumen de 17.71 m³.

En la Tabla 9 se muestran los resultados a los ensayos realizados para este modelo.

	Velocidad inicial(x, y, z) m/s	Módulo velocidad m/s	Presión kPa	Aceleración m/s²
Ensayo 1	3,0,-5	5.83	50	100
Ensayo 2	3,0,-5	5.83	75	800
Ensayo 3	3,0,-15	15.30	75	8000
Ensayo 4	3,0,-15	15.30	100	choque

Tabla 9: Resultados modelo 7

En este modelo igual que en el anterior obtenemos malos resultados.

Tras observar detenidamente las imágenes generadas por Abaqus en el impacto (*Ilustración 54*) observamos una gran distorsión de la geometría diseñada. Este fenómeno lo podemos observar también en el modelo anterior.

Comparando este modelo con el modelo 5 (*Ilustración 49*) podemos ver la magnitud de este problema. Ambos han sido ensayados bajo las mismas condiciones.

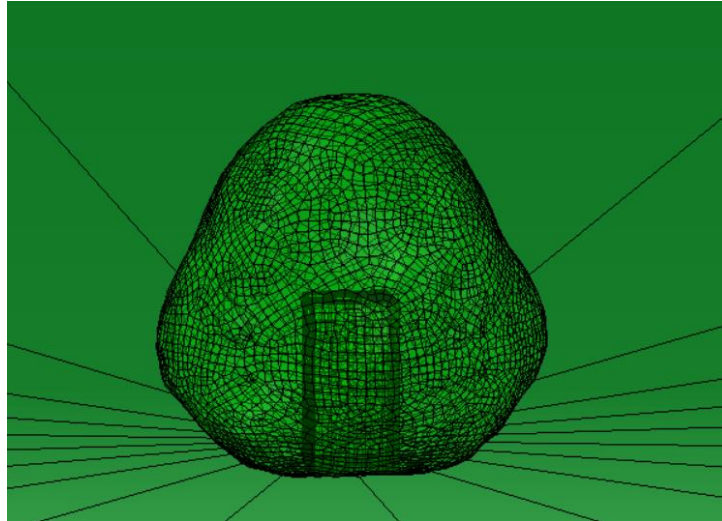


Ilustración 54: Impacto modelo 7, distorsión de la geometría inicial

Este problema se podría resolver en la realidad con la colocación de tendones que mantengan la forma en el airbag. Debido a la complejidad de la implementación de estos en Abaqus, hemos decidido buscar otra disposición de geometrías con una sola cavidad fluida pero de tal manera que tenga mayor superficie de contacto entre el airbag y el prisma para evitar esta deformación excesiva, descartando la unión mediante puntos de este modelo.

4.10. Modelo 8

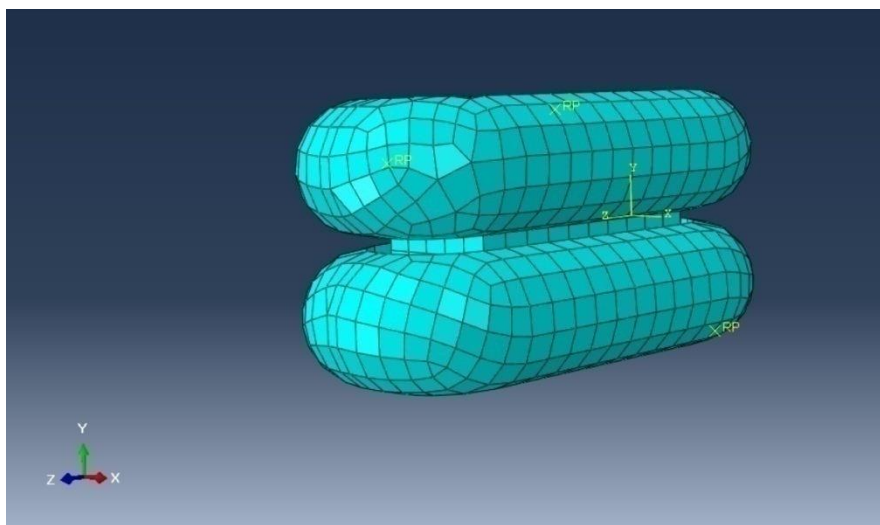


Ilustración 55: Modelo 8

Este modelo surge con la idea de recubrir el prisma con una especie de cilindros que rodeen el perímetro del prisma recubriéndolo por todas sus partes de igual manera al tener radio constante. En este primer caso hemos conformado el airbag con dos de estos cilindros.

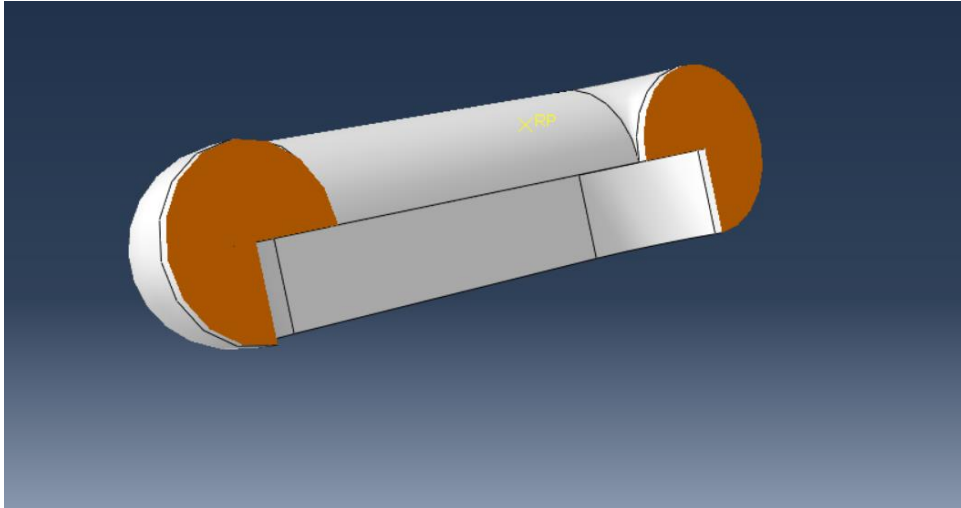


Ilustración 56: Sección del modelo 8

Estos cilindros tendrán un radio de 0.45m y una longitud total de 3.8 metros. Los dos cilindros necesarios para completar nuestra simulación tendrán un volumen total de 4,60. Con un volumen menor conseguiremos cubrir mayor superficie del prisma a proteger. También habremos aumentado la superficie de contacto. Tras la simulación de los ensayos veremos si se ha conseguido el propósito que se perseguía.

En la Tabla 10 se muestran los resultados a los ensayos realizados para este modelo.

	Velocidad inicial(x, y, z) m/s	Módulo velocidad m/s	Presión kPa	Aceleración m/s²
Ensayo 1	3,0,-8	8.45	30	1500
Ensayo 2	3,0,-8	8.45	50	250
Ensayo 3	3,0,-10	10.44	50	500
Ensayo 4	3,0,-12	12.36	60	750
Ensayo 5	3,0,-12	12.36	65	700
Ensayo 6	3,0,-15	15.30	75	2500
Ensayo 7	3,0,-15	15.30	150	2000
Ensayo 8	10,0,-20	22.36	200	7000

Tabla 10: Resultados modelo 8

En el ensayo número 2 y 3 conseguimos buenos resultados para módulos de velocidad 8.45 y 10.44 m/s con una presión de 50 kPa. Si bajamos la presión a 30 kPa con velocidad 8.45 m/s se produce el choque del prisma (*ensayo 1*). Mientras que al subir la velocidad en los ensayos 4 y 5 hasta los 12.36 m/s obtenemos aceleraciones por encima de nuestro objetivo.

En los posteriores ensayos con velocidades mayores a 15m/s obtenemos choque entre cápsula y superficie.

Este modelo lo podemos mejorar fácilmente, añadiéndole mayor volumen en las zonas de impacto, porque presenta un volumen bajo. Aunque el resto de impactos no los soporta, esta disposición presenta resultados positivos, únicamente tiene volumen de 4,60 m³.

Analizando las imágenes del los distintos impactos observamos una distorsión de la geometría. En la Ilustración 57 vemos como los extremos al no tener restringidos los movimientos se desplazan hacia los lados desprotegiendo la superficie sobre la que se produce el contacto, minimizando la efectividad de esta configuración.

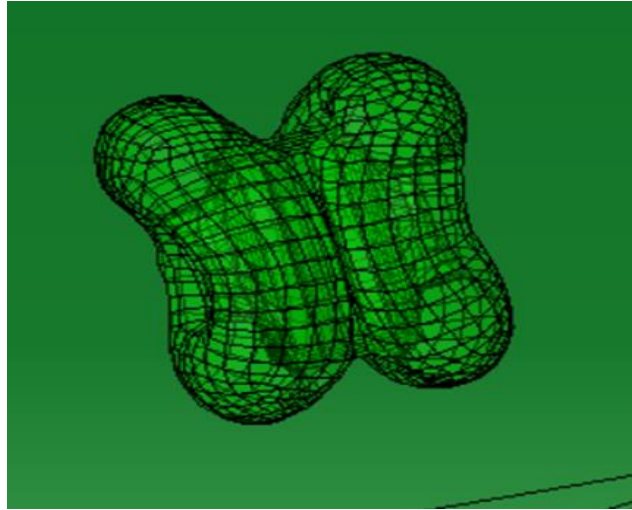


Ilustración 57: Impacto modelo 8, los extremos se separan durante el ensayo

En los siguientes modelos implementaremos mejoras extraídas de anteriores modelos e intentaremos realizar modelos con una sola fluid cavity.

4.11. Modelo 9

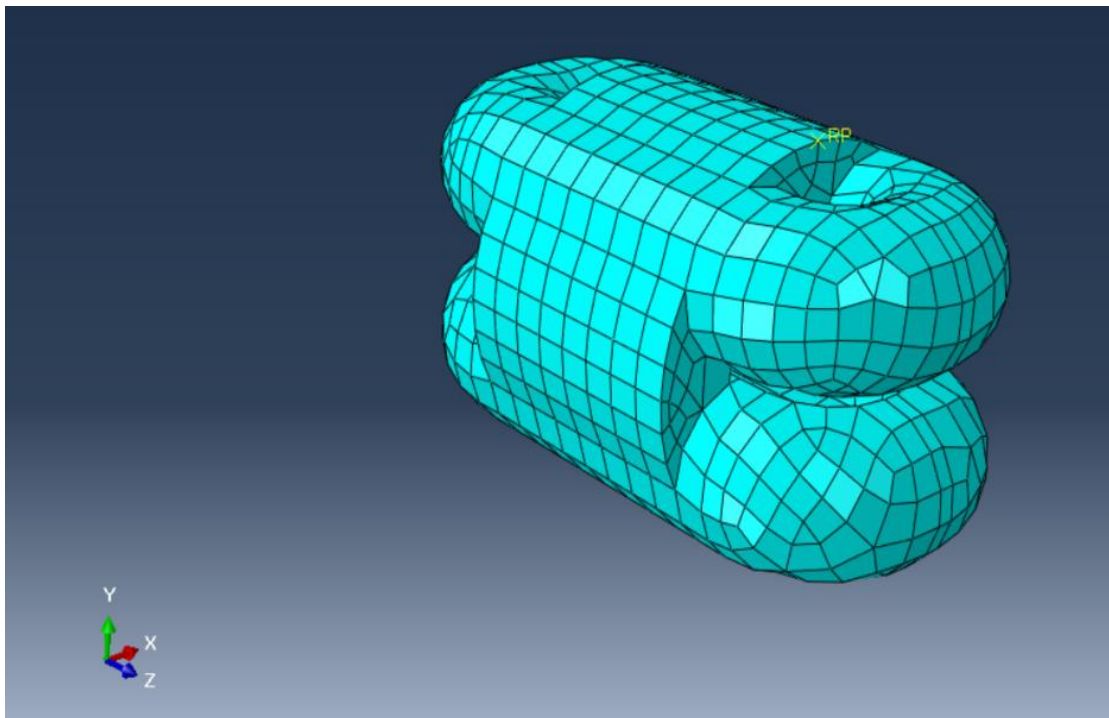


Ilustración 58: Modelo 9

En este modelo hemos decidido poner en contacto todo el aire comunicando ambas fluid cavity en la sección central del anterior modelo. Se ha tenido especial cuidado a la hora de crear esta cavidad central, de tal manera que no distorsione el espacio creado para alojar el prisma y que luego no nos dé error en la ejecución del job en Abaqus.

La sección creada es un prisma circular de radio interior 0.58 m y de radio exterior 1.10 m, tiene una longitud de 1.6 metros. En total esta cavidad tiene un volumen de 8.46 m^3 . En las Ilustración 59 y Ilustración 60 se muestran algunas cotas de interés de este modelo.

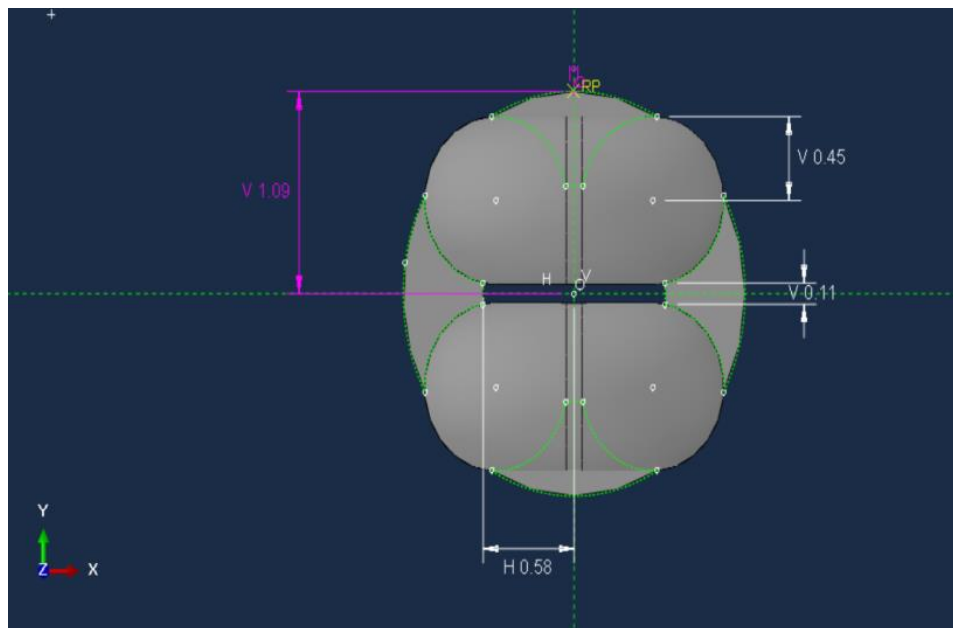


Ilustración 59: Cotas de interés modelo 9

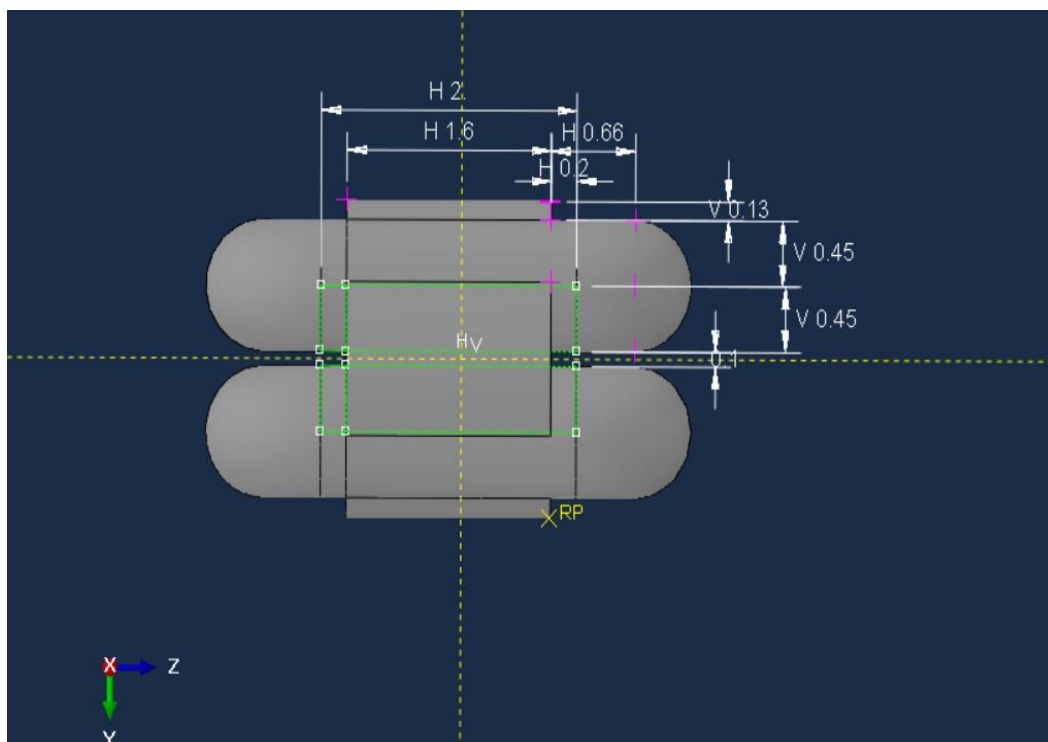


Ilustración 60: Cotas de interés 2-modelo 9

En la Tabla 11 se muestran los resultados a los ensayos realizados para este modelo.

	Velocidad inicial (x, y, z) m/s	Módulo velocidad m/s	Presión kPa	Aceleración m/s²
Ensayo 1	3,0,-6	6.70	35	335
Ensayo 2	3,0,-8	8.45	35	600
Ensayo 3	3,0,-6	6.70	40	400
Ensayo 4	3,0,-8	8.45	45	800
Ensayo 5	3,0,-8	8.45	50	1200
Ensayo 6	3,0,-10	10.44	50	2000
Ensayo 7	3,0,-15	15.30	75	6000
Ensayo 8	3,0,-15	15.30	90	5000

Tabla 11: Resultados modelo 9

Como punto inicial en este modelo se comenzó simulando a presión de 50 kPa para velocidades de módulo 8.45 y 10.44 m/s. Se obtuvo un resultando con elevadas aceleraciones pero sin choque. Decidimos bajar las presiones a 35 kPa se logró un resultado muy bueno, gracias a esto pudimos amortiguar una velocidad de -8 m/s en el eje z con una presión relativamente baja.

En el modelo número 5 obtuvimos un resultado similar aunque este tenía un volumen de 16.17m^3 , mientras que el presente tiene un volumen de casi la mitad, 8.46m^3 .

Los siguientes ensayos presentan choque a presiones de 75 y 90 kPa y velocidad de 15.30 m/s.

Como evolución a este modelo estudiaremos la incorporación de refuerzos en la superficie de impacto, de tal manera que cumpla una doble función. Por una parte buscaremos el aumento del volumen del sistema en la cara que se produce el primer impacto. La segunda función deseada se resume en mantener unidos los semicilindros. La finalidad de esto es evitar la separación en los extremos tal y como se puede observar en la Ilustración 57.

4.12. Modelo 10

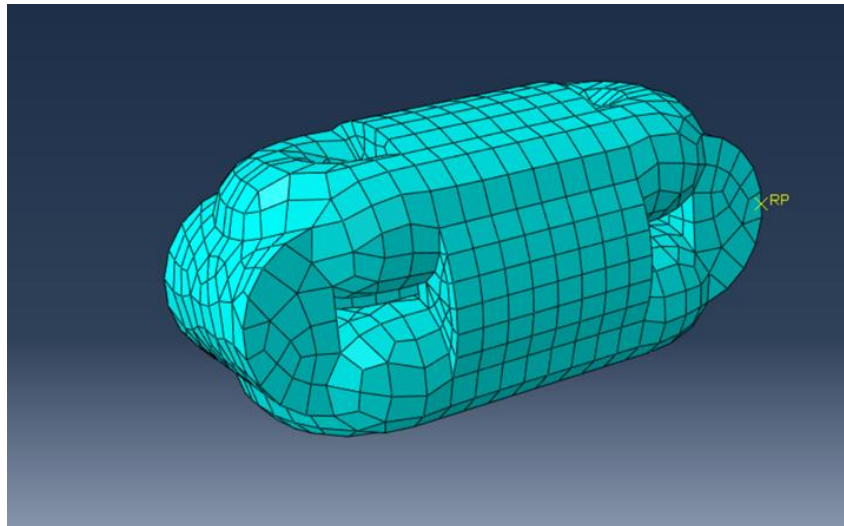


Ilustración 61: Modelo 10

La novedad de este modelo es la inclusión de dos nuevos semicilindros en el conjunto manteniendo así una sola fluid cavity. Dichos semicilindros tienen un radio de 0.65 metros

y una longitud de 1.3 metros. Volumen total de 9.35 m^3 (Ilustración 61), la cantidad de material necesaria para su construcción es 111.69 m^2 .

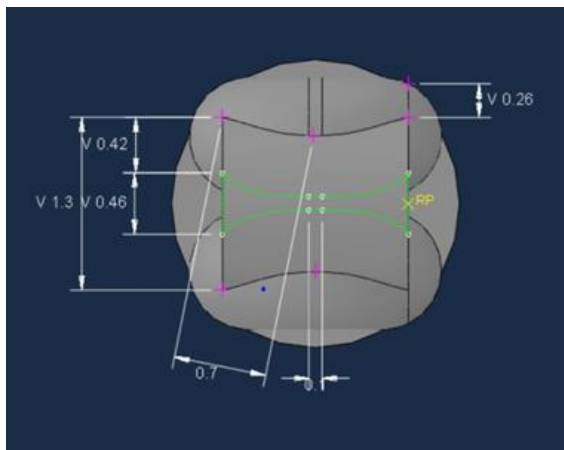


Ilustración 62: Cotas de interés modelo 10

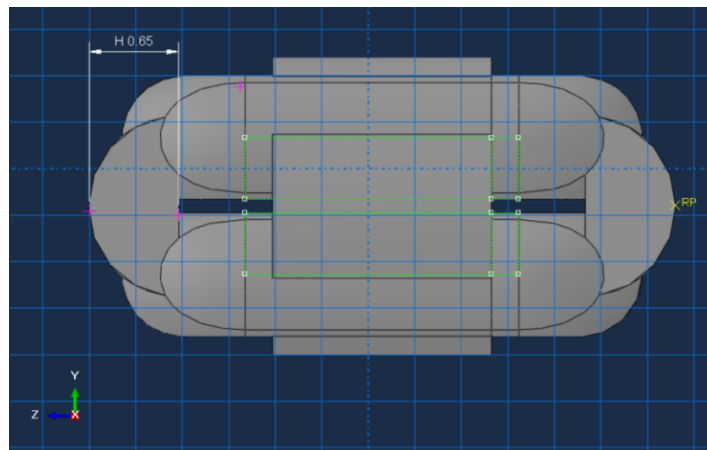


Ilustración 63: Cotas de interés 2- modelo 10

En la Tabla 12 se muestran los resultados a los ensayos realizados para este modelo.

	Velocidad inicial (x, y, z) m/s	Módulo velocidad m/s	Presión kPa	Aceleración m/s ²
Ensayo 1	2,0,-8	8.25	30	500
Ensayo 2	2,0,-10	10.19	40	1500
Ensayo 3	2,0,-10	10.19	45	1000
Ensayo 4	2,0,-10	10.19	50	600
Ensayo 5	2,0,-15	15.13	75	3500
Ensayo 6	7,0,-17	18.38	100	4000
Ensayo 7	10,0,-15	15.81	100	3000
Ensayo 8	10,0,-15	15.81	120	2500
Ensayo 9	10,0,-15	15.81	150	2000
Ensayo 11	10,0,-15	15.81	200	3500
Ensayo 12	10,0,-15	15.81	250	3000

Tabla 12: Resultados modelo 10.

Como en anteriores modelos comenzaremos con una presión de 50 kPa e iremos disminuyéndola para ver si se repiten los buenos resultados obtenidos para baja presión en el anterior modelo.

El primer ensayo (50 kPa con velocidad de 2, 0,-10) lo resiste pero con una aceleración de 600 m/s^2 . Tras varios ensayos bajando la presión, llegamos a un resultado para una simulación de 2, 0,-8, con una aceleración de 500 m/s^2 . Para el modelo previo se obtuvo una aceleración de 600 m/s^2 , por lo que vamos progresando en la búsqueda de nuestro modelo final.

En cuanto a los ensayos a mayor presión, hemos ido desde un rango de 100 a 250 kPa, para una velocidad de 15.81 m/s . Hemos conseguido un resultado de impacto entre prisma y superficie rígida. Aquí podemos encontrar una primera diferencia en cuanto al funcionamiento con modelos de varias fluid cavity. En el modelo número 5 (*Tabla 7*) vemos como era capaz de soportar impacto de 20.61 m/s a una presión de 200 kPa.

Con este resultado vamos a ver la respuesta de este modelo ante impactos en cualquier superficie (*Ilustración 64*).

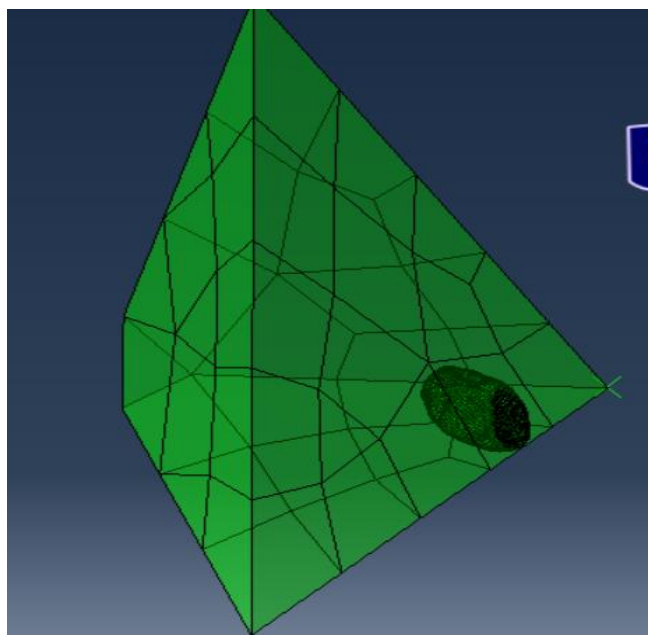


Ilustración 64: Modelo 10 impacto en geometría cerrada

Si realizamos un ensayo metiendo este modelo en una superficie cerrada para evaluar el comportamiento del mismo ante distintos ángulos de caída y velocidades de impacto,

obtenemos estos resultados. Este ensayo se hace a presión de 50 kPa y velocidades en los ejes x, y, z de 4, 8, 6 m/s respectivamente (*Ilustración 65*).

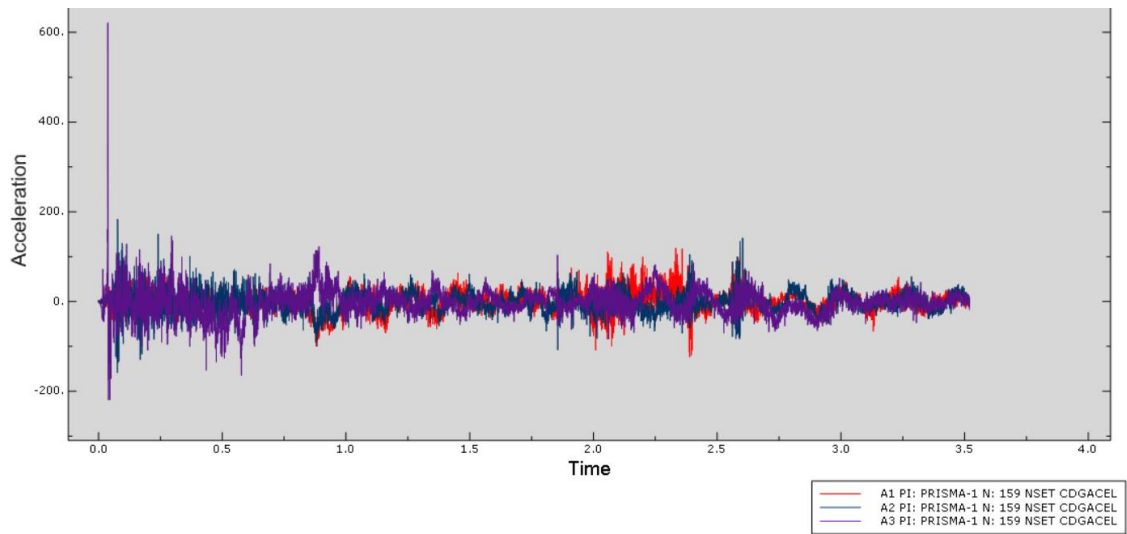


Ilustración 65: Ensayo pirámide velocidad 4, 8, 6 m/s

Como podemos observar el airbag no soporta el impacto en la superficie lateral del prisma, intentaremos mejorar el recubrimiento en esta parte.

4.13. Modelo 11

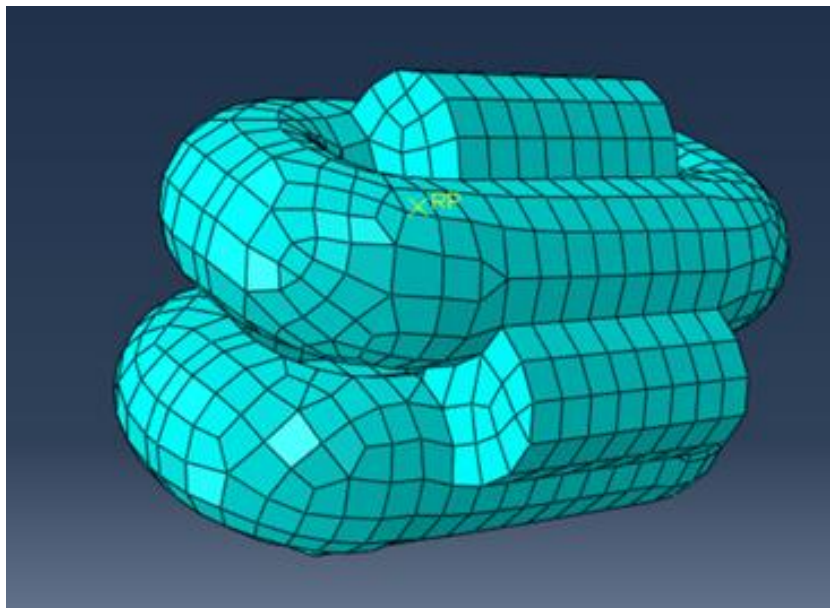


Ilustración 66: Modelo 11

En este modelo aumentaremos el volumen, extruyendo unos prismas con sección de semielipse y colocándolas en las tapas laterales (*Ilustración 66*). Sigue manteniendo los cilindros de los tres modelos anteriores, gracias a ello hemos subido el volumen hasta 9.34 m^3 .

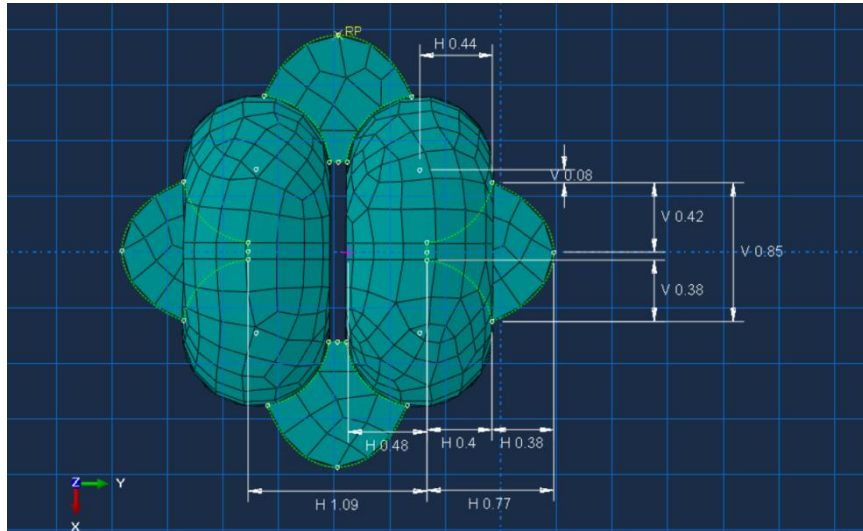


Ilustración 67: Cotas de interés modelo 11

En la Tabla 13 se muestran los resultados a los ensayos realizados para este modelo.

	Velocidad inicial(x, y, z) m/s	Módulo velocidad m/s	Presión kPa	Aceleración m/s^2
Ensayo 1	3,0,-10	10.44	35	500
Ensayo 2	3,0,-10	10.44	50	600

Tabla 13: Resultados del modelo 11

Con estos dos únicos ensayos vemos que tiene buen resultado. Hemos conseguido, en un primer impacto a velocidad 10.44 y presión 50 kPa, una aceleración de 600 m/s^2 . En la simulación de Abaqus podemos ver que no choca con el suelo (*Ilustración 68*), por lo que si bajamos la presión, manteniendo esta velocidad, podremos conseguir bajar el valor de esta. Por eso realizamos el ensayo 1 a presión de 35 kPa y obtuvimos el resultado de 500 m/s^2 .

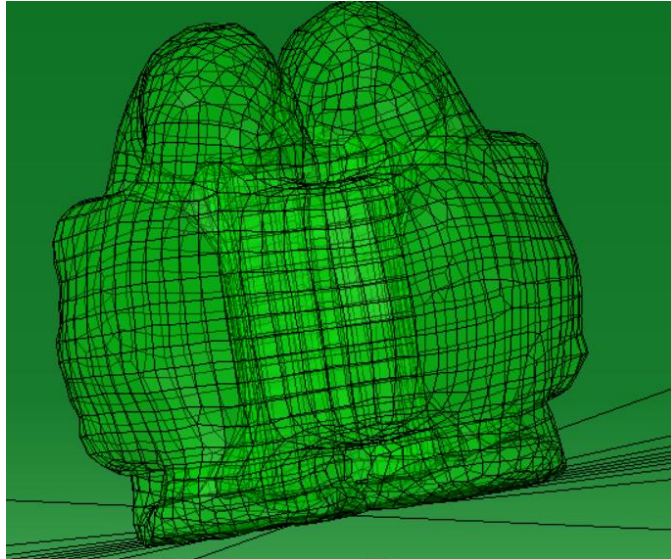


Ilustración 68: Ensayo modelo 11, impacto contra superficie

Al igual que nos pasaba con anteriores modelos debemos juntar los extremos de este modelo para que no se separe en el impacto (*Ilustración 69*).

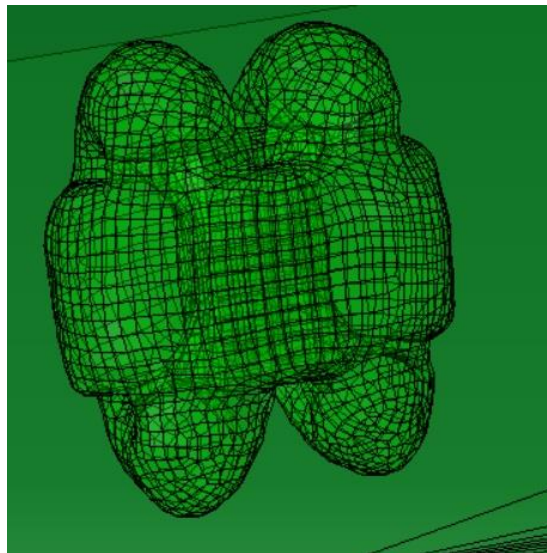


Ilustración 69: Ensayo (bis) modelo 11, los extremos se separan al no estar unidos

4.14. Modelo 12

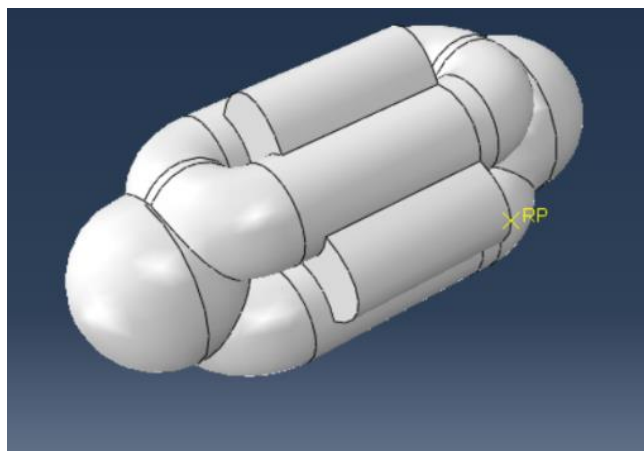


Ilustración 70: Modelo 12

En este modelo, en lugar de añadir semicilindros en los extremos como en el modelo 11, decidimos agregar unas esferas de radio 1 metro, manteniendo la geometría del modelo anterior (*Ilustración 70*) Este modelo tiene un volumen total de 11.90 m^3 . La cantidad de material necesaria para su construcción es 115.53 m^2 .

En la Tabla 14 se muestran los resultados a los ensayos realizados para este modelo.

	Velocidad inicial(x ,y, z) m/s	Módulo velocidad m/s	Presión kPa	Aceleración m/s²
Ensayo 1	3,0,-8	8.45	30	350
Ensayo 2	3,0,-10	10.44	45	450
Ensayo 3	3,0,-12	12.36	50	800
Ensayo 4	3,0,-12	12.36	52	800
Ensayo 5	3,0,-12	12.36	55	710
Ensayo 6	3,0,-12	12.36	60	700
Ensayo 7	10,0,-15	18.02	150	750
Ensayo 8	10,0,-20	22.36	200	1250

Tabla 14: Resultados modelo 12

En el ensayo a 3, 0,-8 con presión de 30 kPa obtuvimos mejora en comparación con el modelo 10, reduciéndose la aceleración hasta 350 m/s^2 . Poco a poco subimos la presión hasta 60 kPa consiguiendo un resultado de 700 m/s^2 para velocidad de 3, 0,-12.

Una velocidad de -10 m/s es capaz de amortiguarla con una presión de 45 kPa mientras que en el caso del modelo 10 teníamos que utilizar mayor presión (*Tabla 12*).

Obtenemos una mejora en los ensayos a mayor presión, 150 kPa y 200 kPa, comparando con el modelo 10 se obtiene un ensayo sin impacto aunque con una aceleración muy grande, por encima de nuestro límite (*Tabla 12 y Tabla 14*).

No sabemos si podremos mejorar estos resultados añadiendo mayor volumen a todo el conjunto. Hemos observado que en este tipo de geometría con una sola fluid cavity al aumentar la presión en el momento del impacto se desplaza mayor cantidad de aire al sitio opuesto al impacto. De esta forma nos encontraremos ante un resultado contrario al buscado (*Ilustración 71 e Ilustración 72*).

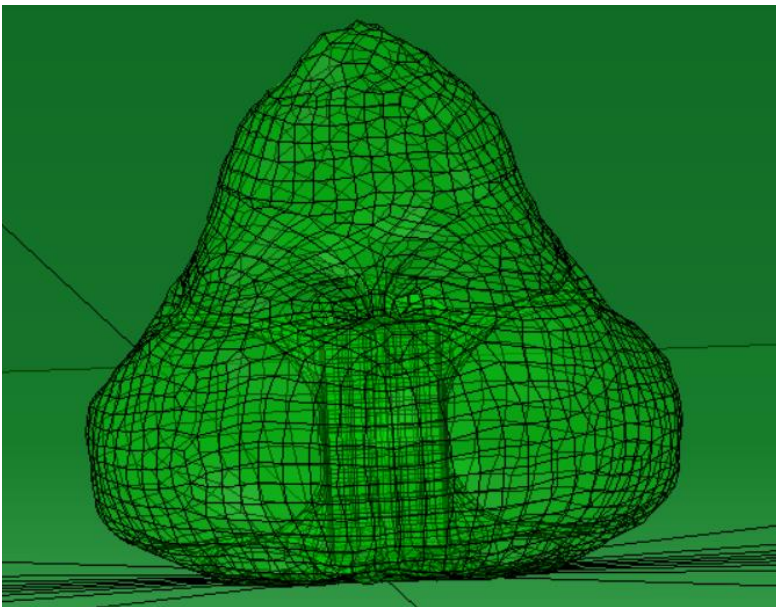


Ilustración 71: Ensayo 7 modelo 12, Mayor cantidad de aire en la zona contraria al impacto

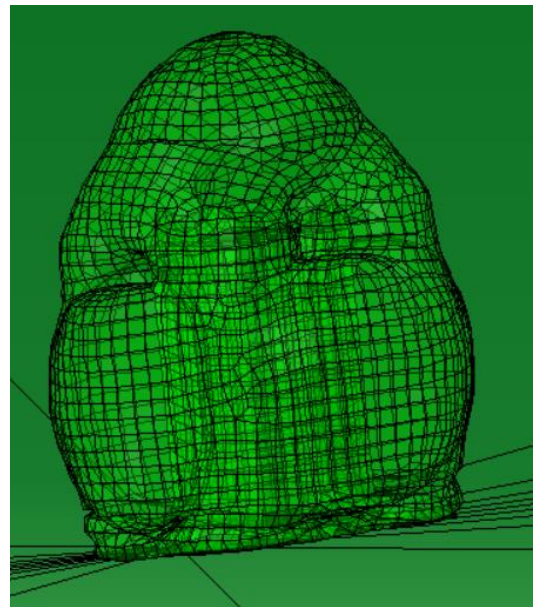


Ilustración 72: Ensayo 2 modelo 12 Mayor cantidad de aire en la zona del impacto

Este efecto vemos cómo aumenta al aumentar la presión por eso intuimos que se obtienen buenos resultados a bajas presiones y peores resultados a altas presiones.

En el siguiente modelo buscaremos mejoras el impacto a velocidades mayores de 10m/s pero sin aumentar mucho la presión. Probaremos a aumentar el volumen del sistema.

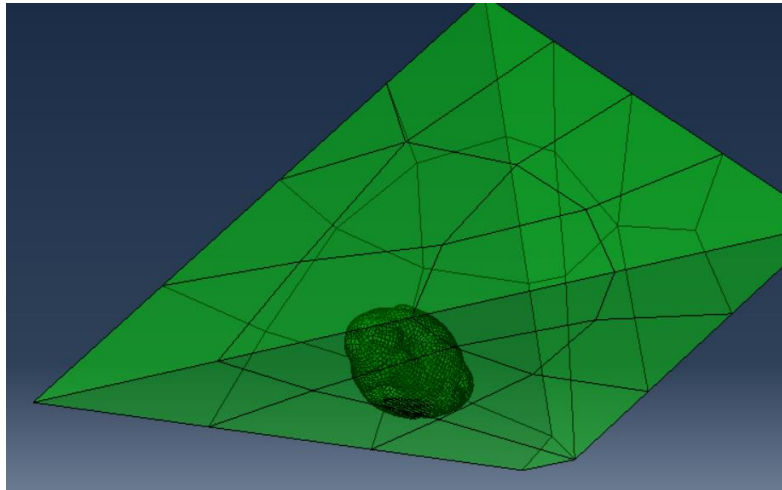


Ilustración 73: Ensayo pirámide modelo 12, Airbag rebotando

Si realizamos un ensayo metiendo este modelo en una superficie cerrada para evaluar el comportamiento del mismo ante distintos ángulos de caída y velocidades de impacto, obtenemos estos resultados. Este ensayo se hace a presión de 50 kPa y velocidades en los ejes x, y, z de 4, 8, 6 m/s respectivamente.

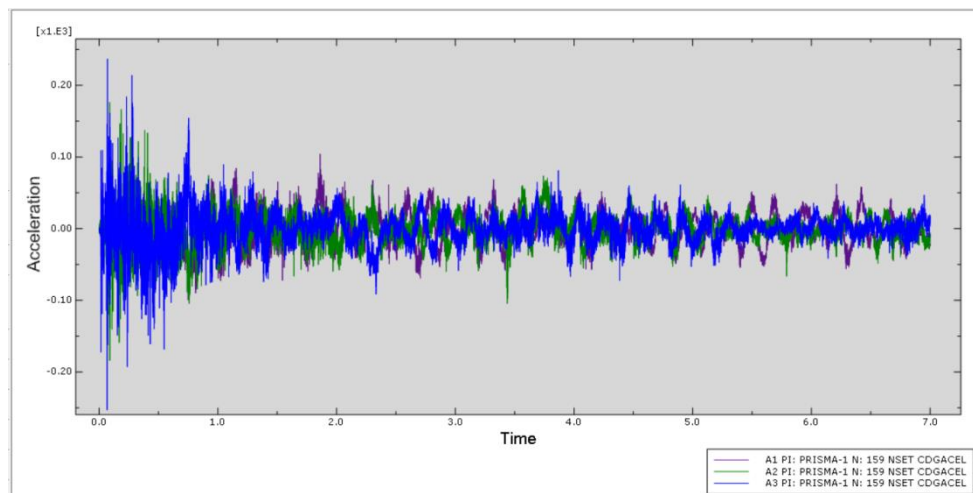


Ilustración 74: Ensayo pirámide modelo 12 (bis). Aceleraciones

En la Ilustración 74 vemos que este modelo resiste el ensayo propuesto en la geometría cerrada.

4.15. Modelo 13

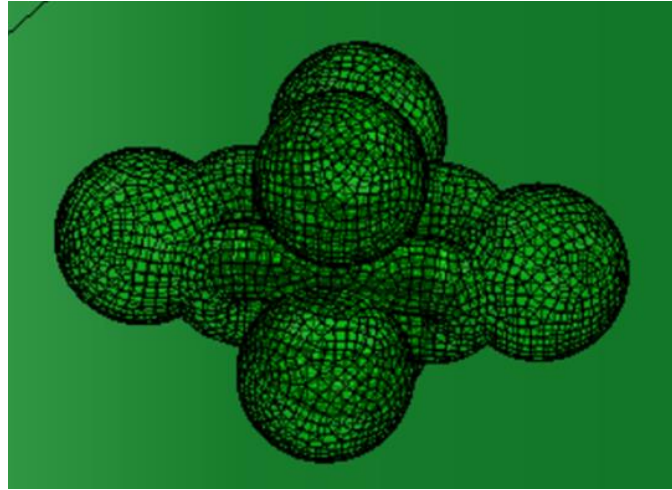


Ilustración 75: Modelo 13

Para conseguir aumentar el volumen y lograr alcanzar las deceleraciones por debajo del límite en los ensayos 6 y 7 del modelo anterior (*Tabla 14*), hemos sustituido las semielipses por esferas de 1 metro de radio. Esto hará que aumente el volumen total hasta 25.45 m^3 .

En la Tabla 15 se muestran los resultados a los ensayos realizados para este modelo.

	Velocidad inicial(x, y, z) m/s	Módulo velocidad m/s	Presión kPa	Aceleración m/s^2
Ensayo 1	3,0,-5	5.83	60	300
Ensayo 2	3,0,-10	10.44	60	400
Ensayo 3	5,0,-15	15.81	100	500
Ensayo 4	5,0,-20	20.61	120	800

Tabla 15: resultados modelo 13

Lo ensayaremos únicamente a presiones mayores a 50 kPa porque ya han quedado patentes las mejoras que introduce este tipo de airbags a presiones bajas en el anterior modelo.

Al colocar estas esferas en los extremos cabe esperar una mejora en el impacto a velocidades mayores de 10 m/s y presiones superiores a 50 kPa. Podemos ver cómo hemos conseguido el objetivo que nos proponíamos en el modelo anterior, en el ensayo 3 aguanta 15.81 m/s con 500 m/s² (Tabla 15).

De ahora en adelante no seguiremos aumentando el volumen, si no que probaremos con otra configuración para ver cómo se comporta y si añade mejoras.

4.16. Modelo 14

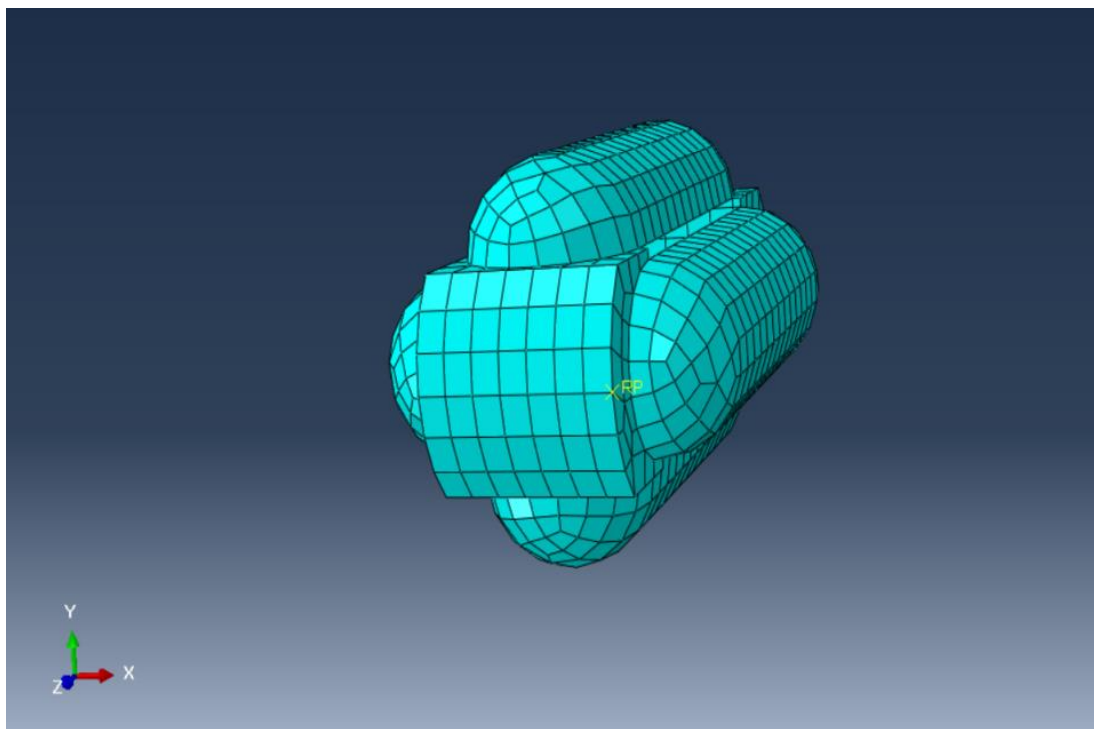


Ilustración 76: Modelo 14

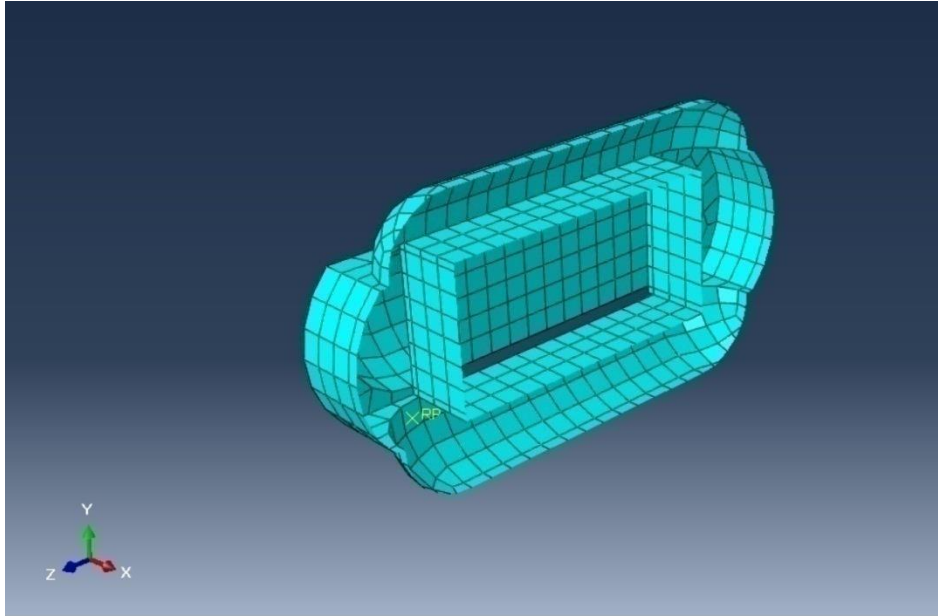


Ilustración 77: Corte modelo 14

En este modelo hemos querido implantar las mejoras extraídas de anteriores modelos para una geometría con una sola fluid cavity.

En esta ocasión hemos colocado cuatro semicilindros en las caras laterales. En las tapas vertical y horizontal hemos decidido incorporar una cavidad en la que se juntan los cuatro semicilindros. Con estas cavidades queremos añadir mayor volumen a la zona en la que se va a producir el primer impacto. El modelo estudiado en este apartado presenta un volumen de 5.15 m^3 .

En la Tabla 16 se muestran los resultados a los ensayos realizados para este modelo.

	Velocidad inicial(x, y, z) m/s	Módulo velocidad m/s	Presión kPa	Aceleración m/s²
Ensayo 1	2,0,-3	3.60	50	200
Ensayo 2	2,0,-8	8.25	50	1000
Ensayo 3	2,0,-8	8.25	60	1200
Ensayo 4	2,0,-6	6.32	75	300

Tabla 16: Resultados modelo 14

En este modelo conseguimos malos resultados lo que nos llevará a suspender el estudio de modelos con características similares.

Comparando modelos observamos diferencias entre los modelos ensayados con una sola cavidad fluida y los ensayados con varias cavidades. Por esto retomaremos la investigación acerca de modelos de varias cavidades.

Tras los modelos realizados podemos observar que para ser capaces de absorber impactos superiores a los 20m/s los airbags de varias fluid cavity son mejores que los de una sola cavidad. En los siguientes modelos estudiaremos distintas disposiciones de airbag con varias fluid cavity.

4.17. Modelo 15

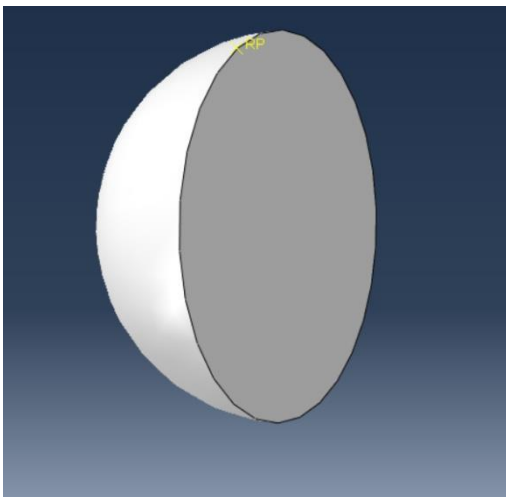


Ilustración 78: Airbag lateral modelo 15

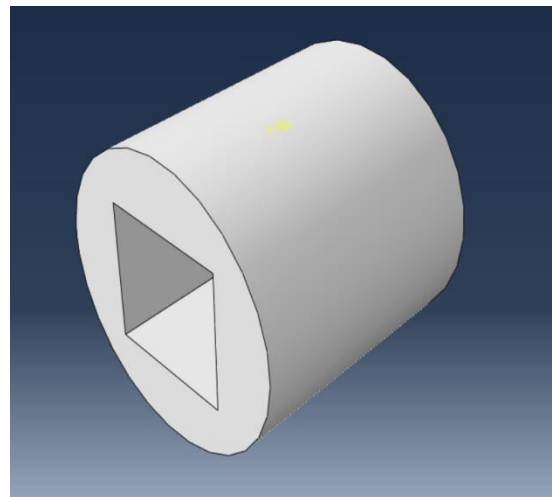


Ilustración 79: Sección central modelo 15

El presente modelo cuenta con tres fluid cavity, dos laterales y una central (*Ilustración 78 e Ilustración 79*). Las dos laterales son dos semiesferas de un metro de radio, mientras que la central es un cilindro de 2 metros de largo en el que se ha vaciado el volumen del prisma a proteger. En total, la suma del volumen de las tres cavidades, es 8.46 m^3 .

En Abaqus se ha unido cada airbag lateral con la superficie correspondiente del prisma y a su vez, se han unido los airbags laterales con el airbag central, de tal manera que se desplazarán todos juntos.



Ilustración 80: Modelo 15

En la Tabla 17 se muestran los resultados a los ensayos realizados para este modelo.

	Velocidad inicial(x ,y, z) m/s	Módulo velocidad m/s	Presión kPa	Aceleración m/s²
Ensayo 1	3,0,-8	8.45	50	350
Ensayo 2	3,0,-10	10.44	50	1300
Ensayo 3	3,0,-10	10.44	75	350
Ensayo 4	3,0,-15	15.30	75	2500

Tabla 17: Resultados modelo 15

Este modelo cuenta con un volumen reducido pero podemos advertir un buen comportamiento ante presiones mayores a 50 kPa y velocidades superiores. Para mejorar conclusiones y poder comparar aumentaremos el volumen en los siguientes modelos.

4.18. Modelo 16

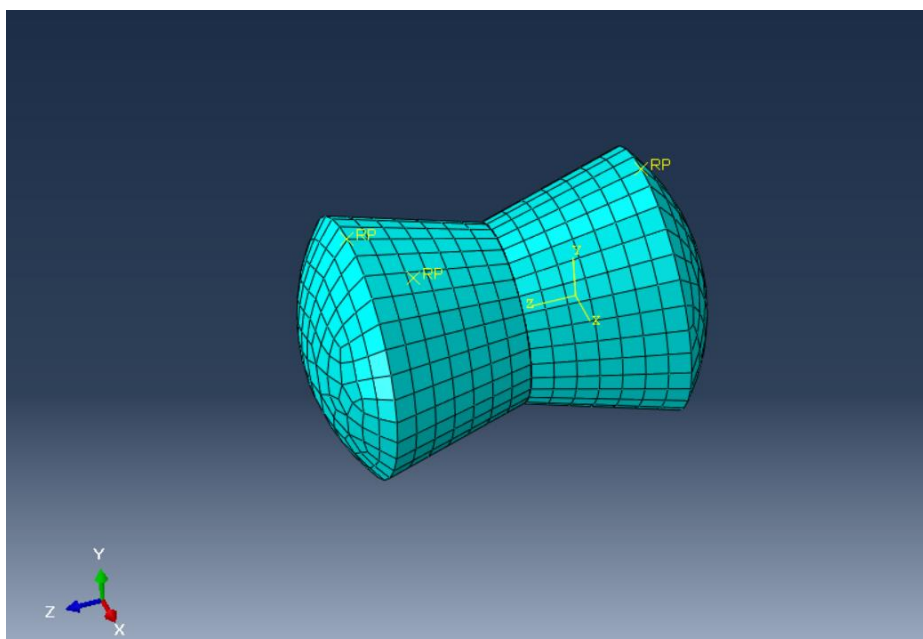


Ilustración 81: Modelo 16

Este modelo presenta un volumen de 16.1 m^3 , casi el doble que el anterior. Está formado por dos airbags creados por revolución, abombados en sus extremos para aumentar la distancia entre extremos de los airbags hasta 5.3 m . Para la construcción de este modelo se necesita un área de $77,4 \text{ m}^2$.

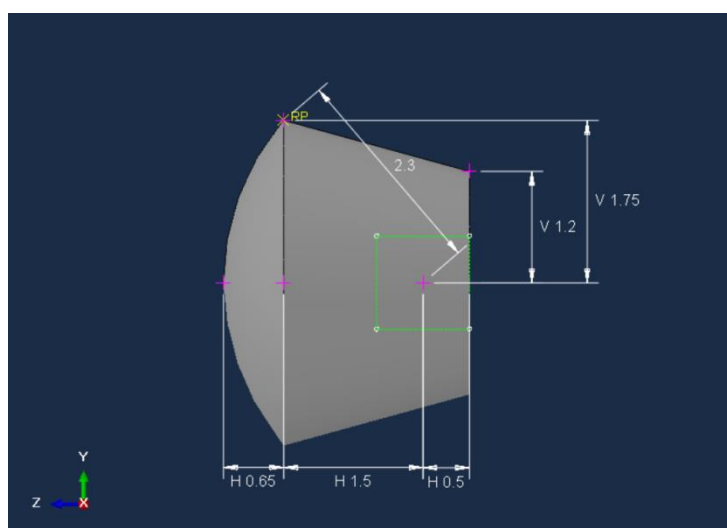


Ilustración 82: Cotas de interés modelo 16

En la Tabla 18 se muestran los resultados a los ensayos realizados para este modelo.

	Velocidad inicial(x, y, z) m/s	Módulo velocidad m/s	Presión kPa	Aceleración m/s ²
Ensayo 1	3,0,-8	8.45	35	250
Ensayo 2	3,0,-6	6.70	40	250
Ensayo 3	3,0,-4	5	50	150
Ensayo 4	3,0,-10	10.44	50	400
Ensayo 5	3,0,-15	15.30	65	350
Ensayo 6	5,0,-20	20.61	75	2000
Ensayo 7	5,0,-20	20.61	90	550
Ensayo 8	10,0-25	26.92	120	1200

Tabla 18: Resultados modelo 16

Ensayándolo a presiones por debajo de 50 kPa obtenemos resultados parecidos a los modelos de una sola fluid cavity. Esto es así por la cantidad de volumen que además está retenido y no puede fluir hasta el sitio contrario al impacto como en los otros casos (*Ilustración 83*).

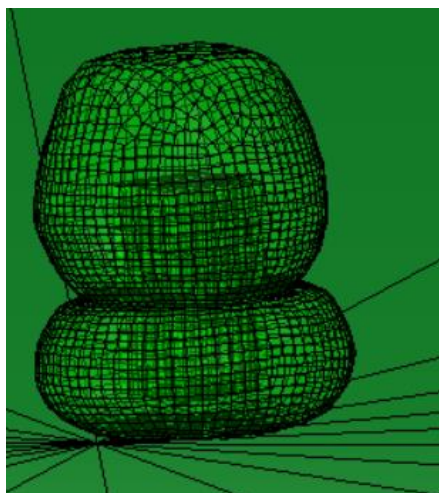


Ilustración 83: Ensayo 5 modelo 16 volumen retenido en airbag inferior.

En cuanto a los impactos a mayor velocidad, hemos mejorado considerablemente. Podemos amortiguar un impacto con un módulo de 15.30 m/s con una presión de 75KPa. Es complicado obtener estos resultados con el otro tipo de geometrías estudiadas. El ensayo número 7 (*Tabla 18*) también arrojó buenos resultados, obteniendo un pico de aceleración de 550 m/s^2 cercano a nuestro valor umbral, para una velocidad de módulo 20.61 m/s.

Estos valores son buenos aunque si queremos resistir impactos a mayores velocidades debemos aumentar el volumen aún más.

4.19. Modelo 17

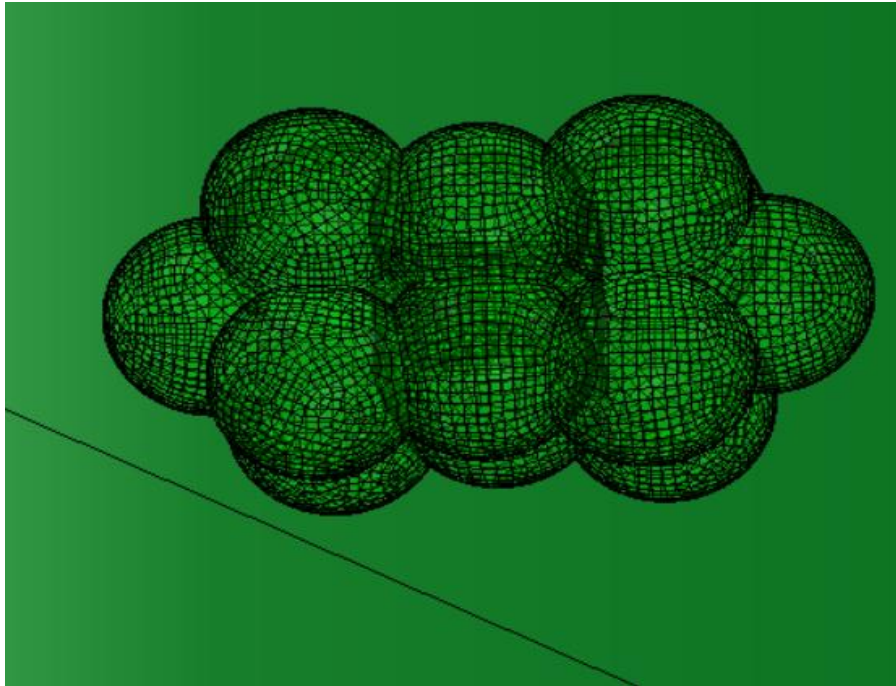


Ilustración 84: Modelo 17

En este diseño con el fin de amortiguar los aterrizajes a velocidades altas, hemos creado un conjunto con un volumen muy grande, porque como hemos visto en resultados de modelos anteriores, cuanto más volumen en la zona que iba a impactar menos aceleración tendrá que soportar el prisma interior.

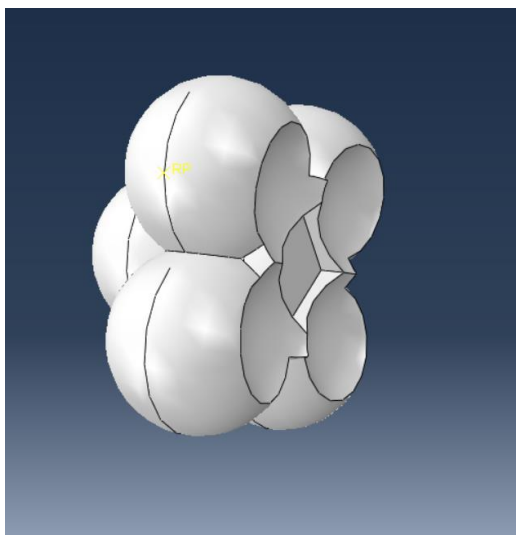


Ilustración 85: Airbag lateral modelo 17

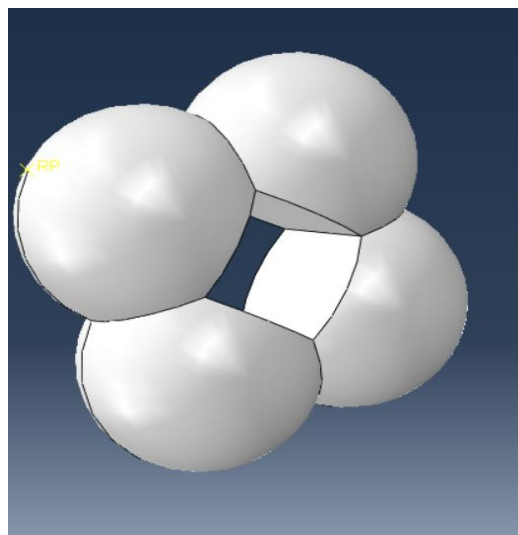


Ilustración 86: Airbag central modelo 17

Para la construcción de este modelo se han utilizado 14 airbags. Es bastante parecido al modelo 6, pero básicamente hemos decidido aumentar el radio de los airbags de 0.75 m a 1m (*Ilustración 87*). También hemos separado cada uno de los airbags para que sea capaz de albergar mayor fluido. Con ello se ha aumentado el volumen hasta 50,06 m³.

El área de material necesario asciende a 132.66 m². Comparando este valor con los modelos 10 y 12, 111.69 m², 115.53 m² respectivamente vemos que no es muy grande la diferencia comparándola con la diferencia de volumen que alberga en su interior. Por este motivo aunque el volumen sea muy elevado en comparación con el resto hemos decidido mantenerlo por no aumentar en exceso la cantidad de material necesario.

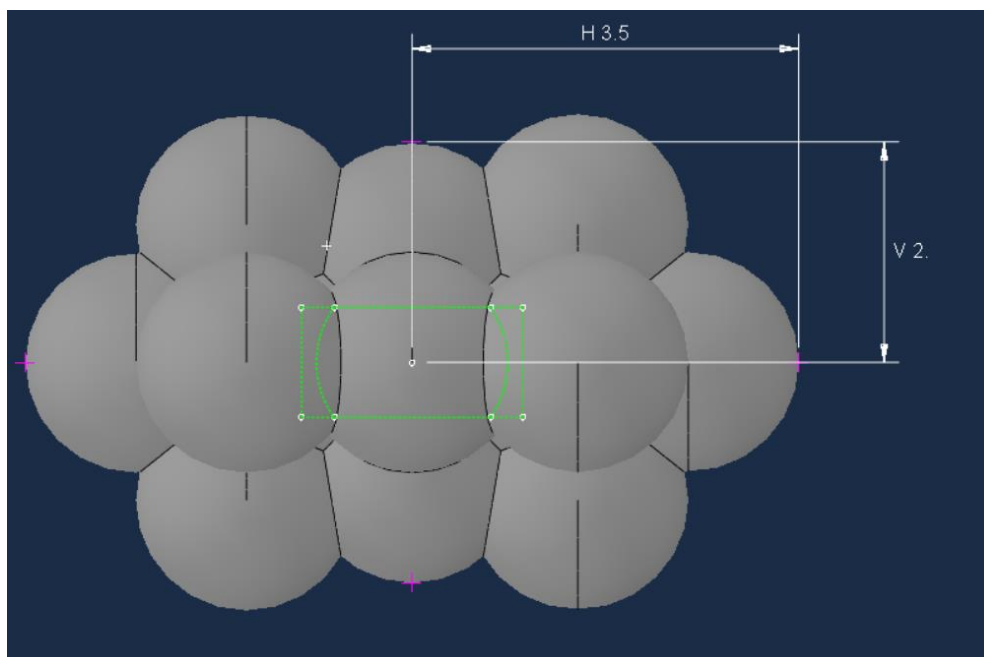


Ilustración 87: Geometría modelo 17

En la Tabla 19 se muestran los resultados a los ensayos realizados para este modelo.

	Velocidad inicial(x, y, z) m/s	Módulo velocidad m/s	Presión kPa	Aceleración m/s²
Ensayo 1	3,0,-8	8.45	35	300
Ensayo 2	10, 0, -17	19.72	50	400
Ensayo 3	10,0,-20	22.36	75	400
Ensayo 4	10,0,-20	22.36	100	400
Ensayo 5	10, 0 -25	26.92	100	450
Ensayo 6	15,0,-30	33.54	150	900
Ensayo 7	15,0,-30	33.54	200	600

Tabla 19: Resultados modelo 17

Con esta distribución de airbags podemos amortiguar impactos de hasta 33.54 m/s de módulo (*Tabla 19*), también funcionará bien a bajas presiones. Podemos observar buenos resultados comparados con los anteriores modelos. Una de las razones de estos resultados

es que este modelo tiene el doble de volumen que nuestro anterior modelo con más volumen.

Con ello nos hemos asegurado una buena protección de todo el conjunto siendo capaz de amortiguar un impacto a 22,36m/s con una presión de 75 kPa (*Ilustración 88*).

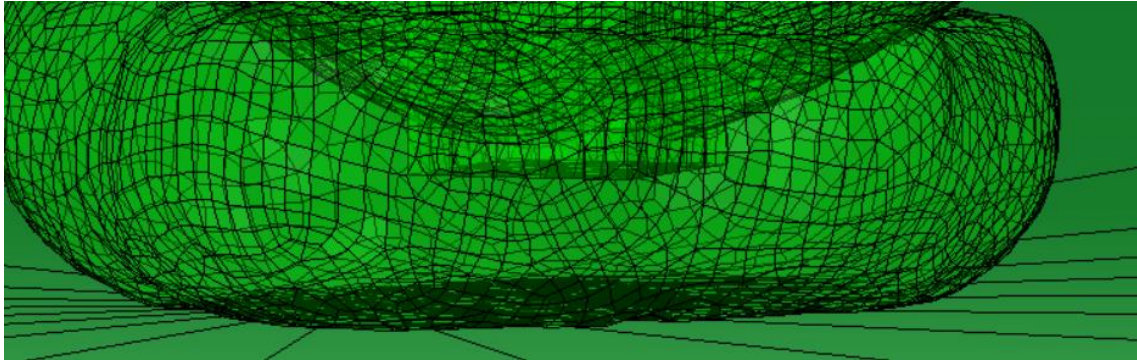


Ilustración 88: Ensayo 3 modelo 17 espacio sobrante en amortiguación

En este ensayo también hemos simulado el impacto en la geometría cerrada diseñada obteniendo estos resultados.

En casi 8 segundos de simulación no supera los 400 m/s², con un módulo de velocidad 22.90 m/s (velocidades por ejes en m/s; x, y, z = 5, 10, 20). En 8 segundos ha conseguido bajar la velocidad del sistema (*Ilustración 89 e Ilustración 90*).

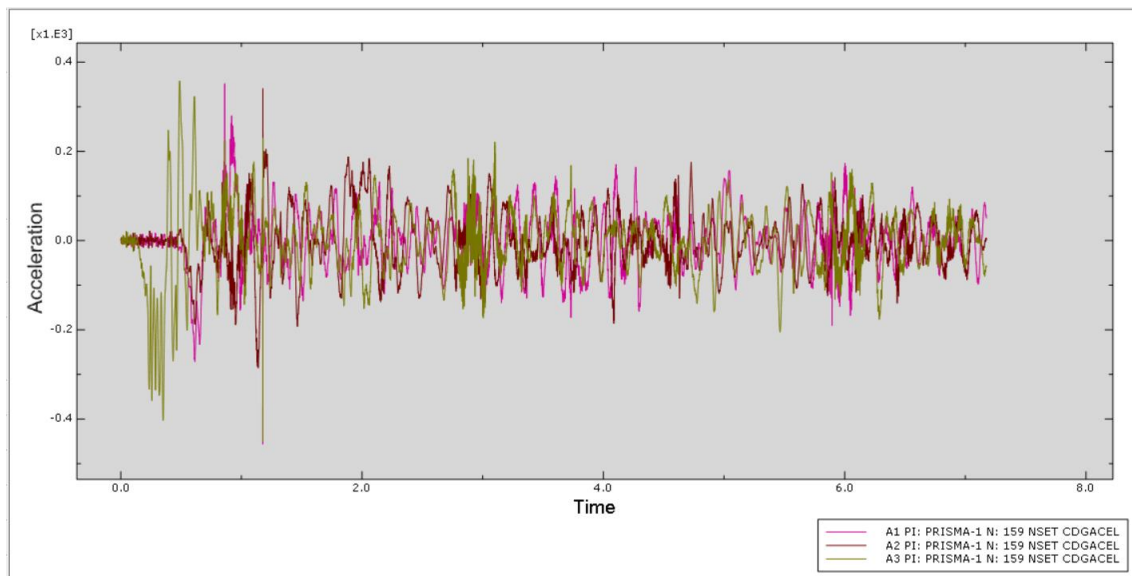


Ilustración 89: Aceleración ensayo geometría cerrada velocidad 5, 10, 15 m/s

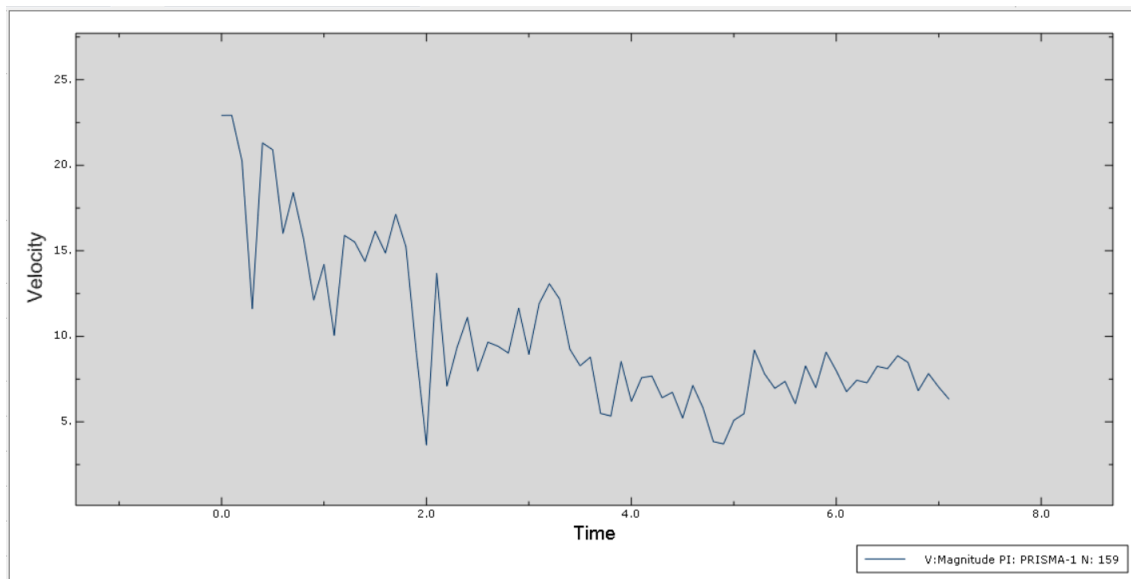


Ilustración 90: Variaciones en la velocidad en el ensayo geometría cerrada

Hemos vuelto a realizar el ensayo cambiando la velocidad en los ejes para asegurar que nuestro airbag está recubierto por todas sus superficies (velocidades por ejes en m/s; x, y, z = 20, 10, 5) (*Ilustración 91*).

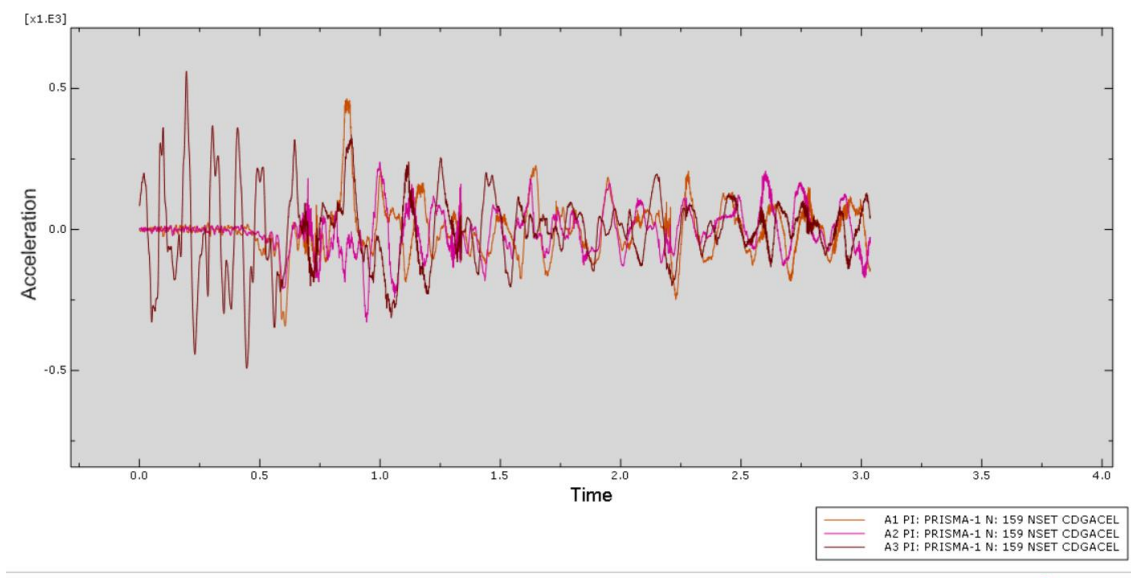


Ilustración 91: Aceleración ensayo a velocidades 20, 10, 5 m/s en superficie cerrada

Para un ensayo de módulo 22.91 m/s en una superficie cerrada aguanta perfectamente el impacto.

5. Conclusiones

A modo de conclusión daremos respuesta a las preguntas de investigación propuestas en el apartado de objetivos.

¿Cómo influye la presión existente en los airbags en un aterrizaje?

En los ensayos realizados hemos visto como dependiendo de la geometría y sobre todo del número de fluid cavity existentes en nuestro modelo varía mucho la respuesta ante distintas presiones.

En modelos con una sola fluid cavity vimos como en los modelos más avanzados cuanto más aumentábamos la presión, mayor era el desplazamiento de la masa de aire a las zonas contrarias al impacto. Por eso, concluimos con que estos modelos trabajaban mejor con presiones menores.

Mientras que en los modelos con varias fluid cavity la masa de aire quedaba retenida en la zona de impacto favoreciendo a los resultados, por lo que en estos modelos podíamos subir la presión para amortiguar velocidades mayores.

¿Qué disposición deberán tener?

Hemos observado que la disposición y la geometría no influyen los modelos realizados. Lo que principalmente influye es la colocación del mayor volumen posible en las zonas en las que se producen los impactos.

¿Cuál es el número adecuado de airbags?

Esto variará según los requerimientos de nuestro problema. En nuestro caso vimos como aumenta la cantidad de material necesario al aumentar el número de cavidades. Al observarse que lo que principalmente influye en la amortiguación es el volumen de aire, hemos decidido maximizar el volumen de aire manteniendo una cantidad de material necesaria lo más baja posible. Esto lo conseguiremos con disposiciones de 2 o 3 cavidades fluidas.

¿Conviene que estén unidos entre sí para un intercambio de fluido?

Dependiendo de la velocidad y presión que necesitemos marcarnos como objetivo. Si nuestro objetivo fuese conseguir el menor volumen posible a una velocidad de impacto relativamente baja, seguramente utilizaríamos modelos con una única fluid cavity, con las zonas de impacto bien protegidas para conseguir una buena amortiguación y evitar el choque de nuestra cápsula con la superficie.

Sin embargo, si nos permiten escoger un volumen más grande y nos piden amortiguar velocidades mayores, nos hubiésemos decantado por airbags con más de una fluid cavity. La presión y el volumen dependerán de la velocidad a amortiguar.

6.Trabajos futuros

Cuando empezamos este trabajo solo se nos ocurrían geometrías sencillas que, con el tiempo y sobre todo la mejora en el uso del programa, cada vez se convertían en más complejas. Si ahora tuviésemos que realizar más geometrías, una vez que conocemos los posibles fallos que cometíamos cuando empezamos, estamos seguros que mejorarían a las presentadas en este trabajo.

Tras ensayar distintos modelos y responder a las preguntas de investigación planteadas en los objetivos del presente trabajo, quedan ciertos puntos en los que no se han profundizado por salirse de estos.

Una línea de mejora sería plantearnos un problema con unos objetivos más concretos, esto es, limitación de peso, de aceleración, costes y otras cosas que no hemos mencionado en este trabajo por salirse de los objetivos de un trabajo de fin de grado. Reduciríamos el espesor de membrana hasta valores lo más bajos posibles porque como vimos había mucha diferencia entre el límite de estos materiales y las tensiones obtenidas en nuestros ensayos.

En varios modelos realizados se hicieron unas uniones muy débiles entre los airbags y el prisma mediante puntos, por lo que la creación de nuevos métodos de unión y restricciones geométricas sería estudiada en un trabajo futuro. A este trabajo añadiríamos la investigación de distintas maneras de controlar la distorsión de forma en los airbags al presurizarlos.

Ya que en este trabajo solamente hemos utilizado aire como gas, en otros trabajos futuros manejaríamos otros gases utilizados en esta industria y otros cuyas propiedades pudiesen favorecer a los ensayos.

Debido a la dificultad para obtener propiedades de materiales hiperelásticos, usamos caucho con peores propiedades que materiales utilizados en la industria aeroespacial. Siguiendo esta línea de estudio, en un futuro, nos marcaríamos la obtención de las propiedades mecánicas de otros materiales con un mejor comportamiento.

7. Bibliografía

- [1] D. Cadogan, C. S. Development and evaluation of the mars pathfinder. *Acta Astronautica* Vol. 50, No. 10, pp. 633–640, 2002. Great Britain: Elsevier Science Ltd.
- [2] Baldwin E. Clark S. European Space Agency, Europe's new era of mars explorationm, Exomars 2016 Media Kit Marzo 2016. Recuperado el 08 de 2017.
- [3] Thomas, C. (04 de 2012). *NASA*. Recuperado el 08 de 2017, de Boeing Tests Parachute System for CST-100 Spacecraft:
<https://www.nasa.gov/exploration/commercial/crew/boeingdroptest.html>
- [4] Saber es práctico. (26 de 06 de 2016). *Marte en 10 datos*. Recuperado el 08 de 2017, de <https://www.saberespractico.com/curiosidades/Marte-en-10-datos-y-su-comparativa-con-la-tierra/>
- [5] Nasa. (s.f.). *Mars Exploration*. Obtenido de Mars facts:
<https://mars.nasa.gov/allaboutmars/facts/#?c=inspace&s=distance>
- [6] *Missions to mars*. (02 de 2016). Recuperado el 08 de 2017, de <http://exploration.esa.int/mars/56504-missions-to-mars/landing/>
- [7] Mail online.(5 de 12 de 2013). *The airbag for your MOBILE : Honda creates emergency device that gives your phone a soft landing when you drop it*. Recuperado el 08 de 2017, de <http://www.dailymail.co.uk/sciencetech/article-2518898/Honda-creates-Case-N-device-gives-phone-soft-landing-dropped.html>
- [8] Editor: NASA Content Administrator. (4 de 08 de 2017). *NASA Project Mercury*. Recuperado el 21 de 08 de 2017, de In the Beginning: Project Mercury:
<https://www.nasa.gov/centers/kennedy/about/history/mercury.html>
- [9] Steve Garber, NASA History Web Curator . (08 de 02 de 2015). Recuperado el 08 de 2017, de <https://www.hq.nasa.gov/office/pao/History/40thann/humanspf.htm#mercury>
- [10] LePage, A. (03 de 02 de 2016). *drewexmachina*. Recuperado el 08 de 2017, de Luna 9: The first lunar landing: <http://www.drewexmachina.com/2016/02/03/luna-9-the-first-lunar->
- [11] Slade R, Sharp 11th AIAA/ISSMO Multidisciplinary Analysis and Optimization Conference, 6 - 8 September 2006, Portsmouth, VirginiaP.AIAA 2006-7001 Analysis,

Optimization and Probabilistic Assessment of an Airbag Landing System for the ExoMars Space Mission Recuperado 08 de 2017.

[12] Zahr J. Trabajo evaluación continua, Modelización numérica de elementos estructurales, curso 2015/2016.

[13]Abaqus 6.10 Documentation, Membrane elements.

<http://Abaqusdoc.ucalgary.ca/books/stm/default.htm?startat=ch03s04atb70.html>

[14] Abaqus 6.10 Documentation Dynamic alalysis procedure overview

<http://Abaqusdoc.ucalgary.ca/books/usb/default.htm?startat=pt03ch06s03abo06.html>

[15] Abaqus 6.10 Documentation Creating and modifying Output Request

<http://Abaqusdoc.ucalgary.ca/books/usi/default.htm?startat=pt03ch14s04s05.html>

[16] Abaqus 2016 Documentation Abaqus/Explicit element

<http://Abaqus.software.polimi.it/v2016/books/usb/default.htm?startat=pt10eli02.html>

Fuentes fotografías:

- (a) Ilustración extraída de: <https://www.mediatrends.es/wp-content/uploads/2016/09/Musk-adelanta-la-llegada-a-Marte-y-la-sita-en-2024-de-nuevo-.jpg>
- (b) Ilustración extraída de: <https://www.jpl.nasa.gov/images/mer/20100126/spiritCV-20100126-browse.jpg>
- (c) Saber es práctico. (26 de 06 de 2016). *Marte en 10 datos*. Recuperado el 08 de 2017, de <https://www.saberespractico.com/curiosidades/Marte-en-10-datos-y-su-comparativa-con-la-tierra/>
- (d) Ilustración extraída de: <http://www.dailymail.co.uk/sciencetech/article-2518898/Honda-creates-Case-N-device-gives-phone-soft-landing-dropped.html>
- (e) Ilustración extraída de: <http://www.jebiggs.com/blog/2006/03/superjumbo-jet-passes-evacuation-drill-33-injured/>
- (f) Ilustración extraída de: <http://www.honda-montesa.es/Seguridad-Honda/Seguridad-Pasiva/images/airbag2.jpg>

- (g) Ilustración extraída de: <http://www.businessinsider.com/euro-ncap-shows-car-crash-testing-20-years-on-2017-2>
- (h) Ilustración extraída de: <https://es.pinterest.com/pin/436778863835033963/?lp=true>
- (i) Ilustración extraída de: <http://www.russianspaceweb.com/luna9.html>
- (j) D. Cadogan, C. S. development and evaluation of the mars pathfinder. *Acta Astronautica Vol. 50, No. 10, pp. 633–640, 2002*. Great Britain: Elsevier Science Ltd.
- (k) Ilustración extraída de <http://www.vectranfiber.com/properties/tensile-properties>